INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Mayo 2019 • N.º 512 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

¿QUÉ OCULTAN LAS ESTRELLAS DE NEUTRONES?

Nuevas observaciones iluminan la forma de materia más densa del universo



INTELIGENCIA ANIMAL

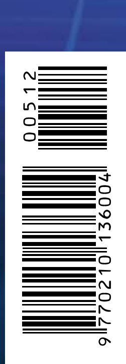
El ingenio de los cefalópodos

MEDICINA

Terapia génica para la sordera

MATERIALES

Superconductividad en el grafeno



INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA
Mayo 2019, Número 512



JOSH EDELSON, GETTY IMAGES

ARTÍCULOS



16



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

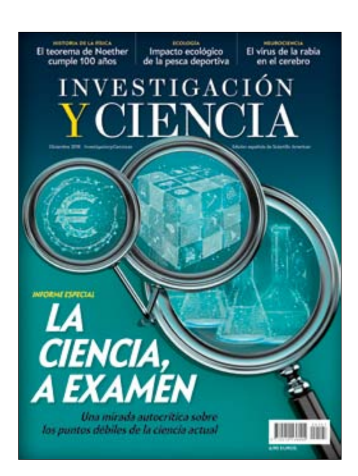
SECCIONES

EN PORTADA

Con una masa similar a la del Sol y el tamaño de una ciudad, las estrellas de neutrones constituyen la forma de materia más densa que permiten las leyes de la física conocida. En su interior, las interacciones nucleares se conjugan con la gravedad bajo condiciones que solo se superan en un agujero negro. La astronomía de ondas gravitacionales y otros experimentos comienzan a aportar pistas sobre qué ocurre en el interior de estos astros. Ilustración de FOREAL.



redaccion@investigacionyciencia.es



Diciembre 2018

REFORMAR LA CIENCIA

Como profesor emérito de genética que ha pasado muchas horas escribiendo propuestas para conseguir fondos, estoy de acuerdo con el artículo de John P. A. Ioannidis «Replantear la financiación» [Investigación y Ciencia, diciembre de 2018]: el sistema tiende a favorecer a los «buenos gestores» en detrimento de los buenos investigadores.

Sin embargo, Ioannidis no habla de los fondos para gastos generales que llenan las arcas de las universidades. Con una financiación estatal cada vez menor, estas dependen cada vez más de esos fondos generales, y esa es la razón por la que se favorece a quien sabe conseguir dinero. Reducir de la abultada administración académica sería una forma modesta de resolver el problema. Pero ¿quién se atreverá a hacerlo?

Paul F. Lurquin
Universidad Estatal de Washington

Si prestamos una atención excesiva a la precisión en la metodología científica, corremos el riesgo de frenar nuevas ideas. A menudo, estas surgen gracias al empleo de enfoques imprecisos. El estudio de casos individuales en medicina; el examen de correlaciones en el comportamiento del consumidor (mi campo de trabajo); o las observaciones inusuales en astronomía pueden conducir a grandes avances basados en hallazgos fortuitos y difíciles de anticipar. Las nuevas ideas suelen ponerse a prueba por medio de experimentos; pero, con frecuencia, el estímulo intelectual que estos proporcionan es limitado.

Robert East
Universidad de Kingston, Londres

Responde Ioannidis: *Lurquin señala el problema de los grandes gastos corrientes de las universidades. Eliminarlos no es fácil, ya que entonces habría que encontrar otra manera de mantener la infraestructura. Aunque, por supuesto, la burocracia innecesaria sí podría reducirse.*

East aboga por el uso de métodos exploratorios imprecisos que puedan dar lugar a nuevas ideas. Tal investigación es justificable y necesaria cuando carecemos de herramientas mejores. Sin embargo, debería reconocerse explícitamente que es exploratoria y que, por tanto, es probable que a menudo sea errónea y necesite ser validada con mejores métodos.

FOMENTAR LA REPLICACIÓN

Como investigador, no me sorprendió leer en «Hacer reproducible la investigación», de Shannon Palus [Investigación y Ciencia, diciembre de 2018], que una gran parte de los resultados, incluidos aquellos publicados en las mejores revistas, no pueden replicarse. Como indica Ionnadis, los investigadores tienen mucha presión institucional y mucha motivación personal para publicar resultados llamativos, pero ninguna para replicar los de terceros.

Debemos reconocer, financiar y motivar explícitamente la replicación. Para ello, sería útil que las revistas tuvieran una sección o una publicación asociada que aceptara estudios de autores independientes que intentasen reproducir trabajos publicados previamente por esas mismas revistas. Los revisores no evaluarían la originalidad o el interés, sino el rigor metodológico, la claridad y, tal vez, una mejora o ampliación de los resultados.

José M. Soler
Universidad Autónoma de Madrid

PROBLEMAS INDECIDIBLES

Fue fascinante leer en «El problema sin solución», de Toby S. Cubitt, David Pérez-García y Michael Wolf [Investigación y Ciencia, diciembre de 2018], que en física teórica hay algunas cuestiones importantes que no pueden decidirse por medio de un cálculo.

Al discutir el ejemplo principal, los autores afirman que determinar la existencia o inexistencia de un salto entre el estado fundamental y el primer estado excitado de un material dependería de que este tuviese una extensión infinita. Pero, de ser así, incluso el mismo material sería incapaz de «decidir» si presenta un salto o no, ya que cualquier influencia causal entre regiones distantes solo podrá propagarse a la velocidad de la luz.

Tony Durham
Brighton, Reino Unido

Responden los autores: *Estrictamente hablando, todo problema indecidible ha de tener un infinito en alguna parte. Si imponemos cualquier límite, aunque sea el tiempo de vida del universo, el problema será decidible.*

En la cuestión del salto espectral, para cualquier red con un tamaño finito y razonablemente grande, el sistema presentará un salto o tendrá un espectro de energías tan denso que será indistinguible de uno sin salto. En principio, si limitamos cuán grande puede ser la red (porque ha de caber en nuestro laboratorio, por ejemplo), el problema podrá resolverse. Pero la indecidibilidad de una red infinita idealizada implica que no hay mejor manera de averiguarlo que tomar una muestra del tamaño del laboratorio y medirlo: una más pequeña no nos dirá nada sobre qué ocurre con la primera. Peor aún, incluso si determinásemos si la muestra con el tamaño del laboratorio presenta o no un salto espectral, el resultado podría cambiar en cuanto añadiésemos un solo átomo a la muestra.

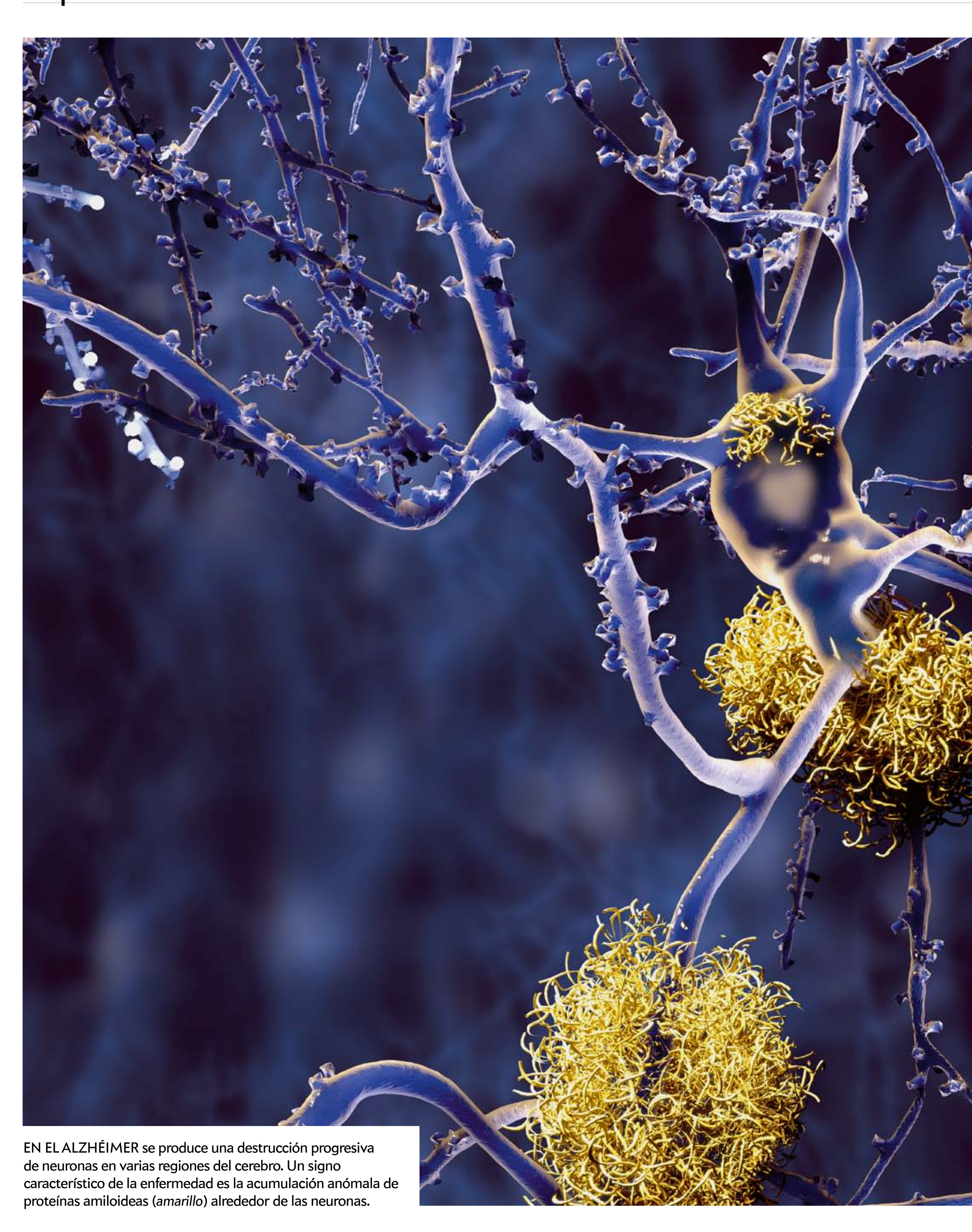
Es importante enfatizar que ningún material real que nadie haya encontrado jamás muestra este comportamiento perverso. Pero podemos buscar sistemas más simples que exhiban una física similar, y hemos informado sobre algunos progresos al respecto en un artículo posterior.

El escenario que plantea Durham es en cierto modo similar al descrito: en principio, dado un tiempo infinito, la velocidad finita de la luz no supone ningún obstáculo. Un límite de tiempo sería cualitativamente similar a la imposición de uno de tamaño, el cual vendría dado por dicho tiempo multiplicado por la velocidad de la luz.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



EN EL ALZHÉIMER se produce una destrucción progresiva de neuronas en varias regiones del cerebro. Un signo característico de la enfermedad es la acumulación anómala de proteínas amiloideas (*amarillo*) alrededor de las neuronas.



© SELVANEGRA/ISTOCKPHOTO

TECNOLOGÍA SANITARIA

Inteligencia artificial contra el alzhéimer

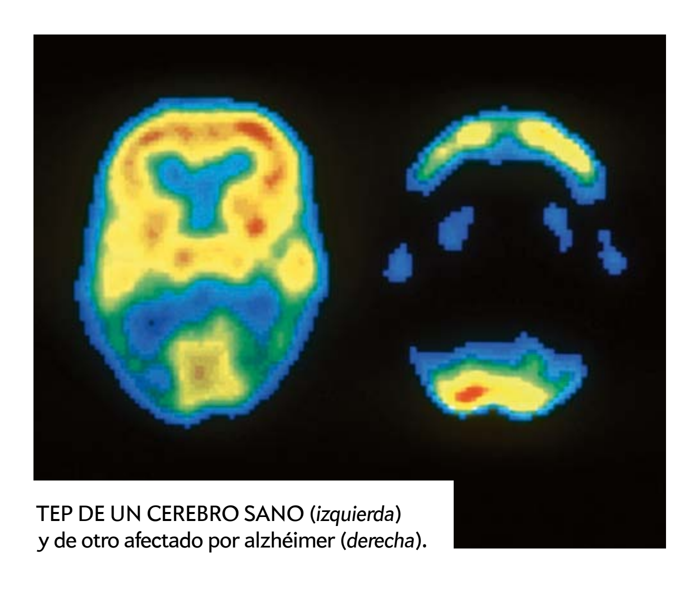
Un algoritmo predice los futuros diagnósticos a partir de imágenes cerebrales

Considerada la demencia más frecuente, se calcula que la enfermedad de Alzhéimer afecta a 5,7 millones de personas solo en EE.UU. y las previsiones indican que la cifra se habrá duplicado con creces en 2050. En España, los afectados son unos 800.000, según la Sociedad Española de Neurología. El diagnóstico precoz resulta esencial para que el enfermo se beneficie de los pocos tratamientos disponibles, pero ningún análisis ni estudio de neuroimagen ofrecen por sí solos un diagnóstico concluyente mientras se permanece con vida; los médicos deben llevar a cabo una batería de pruebas clínicas y neuropsicológicas. Por ello, existe un gran interés en desarrollar la inteligencia artificial como instrumento de detección del alzhéimer a partir de neuroimágenes.

Investigadores de la Universidad de California en San Francisco (UCSF) han logrado entrenar un algoritmo de IA para que reconozca uno de los primeros signos de la enfermedad, la disminución del consumo de glucosa en el cerebro, en imágenes captadas mediante tomografía de emisión de positrones (TEP). El algoritmo acertó el diagnóstico de alzhéimer en casi todos los casos analizados, según el estudio.

En la TEP, se administra al paciente, por vía oral o venosa, una minúscula cantidad de una sustancia radioactiva que permite captar imágenes tridimensionales del metabolismo, la circulación y otras actividades celulares. La TEP se presta bien como herramienta diagnóstica de IA porque el alzhéimer provoca cambios sutiles en el metabolismo cerebral años antes de que el tejido nervioso comience a degenerar, afirma Jae Ho Sohn, radiólogo en la UCSF y uno de los autores del estudio. Esos cambios resultan «sumamente difíciles de percibir por los radiólogos», subraya.

El algoritmo se entrenó y se sometió a prueba con 2100 imágenes de TEP obtenidas de un millar de personas mayores de 55 años. Las imágenes procedían de un estudio de seguimiento de 12 años de personas a las que se les acabó diagnosticando esta demencia, así como a afectados por leves deterioros de la memoria y sujetos de control sanos. El entrenamiento del algoritmo se lle-



TEP DE UN CEREBRO SANO (*izquierda*) y de otro afectado por alzhéimer (*derecha*).

vó a cabo con el 90 por ciento de los datos y se puso a prueba con el 10 por ciento restante. A continuación, se volvió a probar con un segundo conjunto de datos independiente correspondiente a 40 pacientes sometidos a seguimiento durante una década. El algoritmo demostró una elevada sensibilidad: acertó en el 81 por ciento de los pacientes del primer grupo problema, y el 100 por cien del segundo, a quienes se les diagnosticaría la enfermedad seis años después en promedio. Los resultados se publicaron el pasado febrero en *Radiology*.

El algoritmo se basa en el aprendizaje profundo, una técnica de aprendizaje automático que se sirve de redes neuronales artificiales que han sido programadas para aprender de ejemplos. «Esta es una de las primeras aplicaciones prometedoras de ese tipo de aprendizaje en el diagnóstico del alzhéimer», afirma Christian Salvatore, médico del Consejo Nacional de Investigación de Italia, al margen del estudio. «El modelo funciona muy bien cuando se trata de pacientes con un diagnóstico leve o tardío», pero no tanto en los inicios de la enfermedad, «que sigue siendo, pues, una de las grandes asignaturas pendientes en este ámbito.» *—Rod McCullom*

QUÍMICA

¿Metales en mi cerveza?

Algunos métodos de filtración introducen pequeñas cantidades de metales pesados

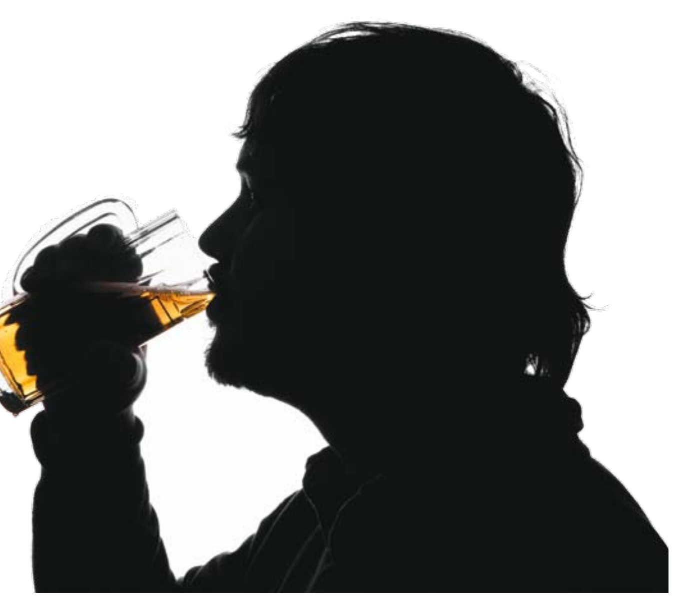
Cuando uno saborea una jarra de cerveza o degusta una copa de vino corre el riesgo de estar tomando algo más que unos tragos placenteros, pues podrían contener metales pesados en cantidades mínimas. Estos elementos se acumulan en el organismo, donde pueden causar problemas de salud, de ahí que organizaciones sanitarias de todo el mundo hayan establecido o propuesto normas con los niveles tolerables para algunos alimentos y bebidas. Algunos expertos señalan ahora a un material filtrante de textura limosa como culpable de los vestigios de arsénico, cadmio y plomo inorgánicos hallados en la cerveza y el vino.

Los elaboradores de ambas bebidas emplean a veces una sustancia denominada tierra de diatomeas en las últimas etapas de la filtración para obtener un producto clarificado, de larga conservación. Formada por los restos fósiles de microorganismos acuáticos, esta sustancia elimina las partículas indeseadas sin alterar el sabor. Experimentos previos indicaban que la filtración con tierra de diatomeas dejaba un rastro de arsénico en los zumos de fruta, pero se ignoraba si sucedía lo mismo con las bebidas alcohólicas.

Benjamin Redan, Lauren Jackson y sus colaboradores, de la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU. (FDA), analizaron el contenido de arsénico de pequeños lotes de bebidas alcohólicas elaboradas en el laboratorio, como cerveza lager y ale, vino tinto y blanco, antes y después de ser filtrados con tres tipos de tierra de diatomeas de calidad alimentaria. Así descubrieron niveles de ese elemento hasta ocho veces mayores que el límite de 10 partes por mil millones propuesto por la FDA para el zumo de manzana (la bebida más similar para la que este organismo oficial ha emitido una normativa). Del mismo modo, hallaron cantidades mínimas de arsénico y de otros contaminantes en algunos vinos comerciales. Los resultados se publicaron en marzo en *Journal of Agricultural and Food Chemistry*.

«Los niveles detectados solo supondrían un peligro para la salud si el consumo diario de cerveza fuera desmesurado, pero el problema de la contaminación por metales pesados en los alimentos es fundamental», afirma Stefano Buiatti, de la Universidad de Udine, que no ha participado en el estudio.

Además, los autores han comprobado que es posible reducir el arsénico de los productos filtrados ajustando la cantidad de tierra de diatomeas o modificando el tiempo de filtración. La industria alimentaria ya emplea otros métodos de purificación. «La aplicación de las técnicas de filtración por membrana ha despertado un gran interés entre los fabricantes de cerveza», asegura Joe Palausky, presidente del comité técnico de la Sociedad Americana de Químicos Cerveceros. «Pero existen otras técnicas más tradicionales y consolidadas, como la estabilización en frío o la maduración y centrifugación, de las que el sector cervecero hace uso.» *—Rachel Berkowitz*



SCIENCE SOURCE (*neuroimágenes*); GETTY IMAGES (*hombre con cerveza*)

SISMOLOGÍA

Aparecen los terremotos ausentes de Nepal

Los geólogos llenan un misterioso vacío en el historial de seísmos del país asiático



LA CIUDAD NEPALÍ DE SANKHU, devastada por el terremoto que sacudió el país en 2015.

Como si se tratara de un accidente de tráfico a cámara lenta, el subcontinente indio está chocando con Eurasia. Este impacto, que se produce a lo largo de una falla conocida como Cabalgamiento Principal del Himalaya, es el responsable de la elevación de la cordillera. En abril de 2015 provocó el terremoto de Gorkha, en Nepal, un seísmo de magnitud 7,8 que destruyó pueblos y partes de Katmandú y que causó miles de víctimas.

Tales seísmos no son extraños en Nepal. Sin embargo, en la parte occidental del país no se había registrado ningún terremoto importante desde 1505. La presencia de esta «brecha sísmica» podría ser una mala noticia: si las fallas no liberan cada cierto tiempo las tensiones acumuladas, uno o más terremotos potencialmente catastróficos podrían estar por llegar. «Tras más de 500 años de espera, la energía almacenada debido a la convergencia de la India [y Eurasia] podría ser considerable», apunta Zakaria Ghazoui, geólogo del Instituto de Ciencias de la Tierra de Grenoble. La repentina liberación de esta energía podría devastar lugares cercanos, como Pokhara, una de las mayores ciudades nepalíes.

A fin de determinar si realmente existía esa brecha sísmica, Ghazoui y otros investigadores se aventuraron en el lago Rara, en la parte occidental del Himalaya nepalí, y recogieron testigos (muestras cilíndricas) de las capas sedimentarias del fondo. Sospechaban que los testigos podían albergar un registro de los terremotos ocurridos en el pasado, ya que un seísmo puede causar avalanchas submarinas que dan lugar a capas de lo que Ghazoui llama sedimentos «desorganizados».

El equipo halló indicios de al menos ocho avalanchas posteriores a 1505 relacionadas con terremotos entre moderados y fuertes. «Esperábamos encontrar vestigios del terremoto de 1505, pero el descubrimiento de esas otras avalanchas fue una auténtica sorpresa», apunta el experto. Por un lado, eso significa que tal vez las fallas de la zona no acumulen tanta tensión como se pensaba. Pero, por otro, también subraya el riesgo sísmico «casi permanente» al que se enfrenta la región, explica Ghazoui, autor principal de la investigación, que aparecerá publicada próximamente en *Nature Communications*.

Según Roger Bilham, sismólogo de la Universidad de Colorado en Boulder que no participó en el estudio, esta es la primera vez que se usa el registro sedimentario de un lago para explorar la historia sísmica del Himalaya. Y eso, asegura, «no es más que un aperitivo de lo que podemos hacer».

—*Lucas Joel*



EL CABALGAMIENTO Principal del Himalaya es una falla situada en la unión de las placas india y euroasiática.

TURJOY CHOWDHURY/GETTY IMAGES (*Sankhu*); FUENTE: «BIMODAL SEISMICITY IN THE HIMALAYA CONTROLLED BY FAULT FRICTION AND GEOMETRY», LUCA DAL ZILIO ET AL. EN *NATURE COMMUNICATIONS*, VOL. 10, ENERO DE 2019; MAPPING SPECIALISTS (*mapa*)

ROBÓTICA

Robots con forma de perro

Un método basado en simulaciones permite que robots cuadrúpedos aprendan a desenvolverse con gran eficiencia en el mundo real

Programar robots capaces de caminar, correr y asir objetos es una tarea ardua, por lo que los investigadores preferirían que las máquinas aprendiesen por sí mismas. Para evitar el desgaste físico que sufren los robots que aprenden por ensayo y error, varios grupos están desarrollando técnicas para simularlos y transferir después las habilidades así adquiridas a los verdaderos autómatas. Ahora, un nuevo método ha empleado los datos de los robots reales para mejorar las simulaciones. Ello cierra el círculo y ha dado lugar a robots más rápidos y ágiles.

Un grupo de la Escuela Politécnica Federal (ETH) de Zúrich ha incorporado redes neuronales (modelos computacionales inspirados en el cerebro humano) a los algoritmos de un robot cuadrúpedo llamado ANYmal. A medida que la máquina deambula por el mundo real, las redes neuronales aprenden las peculiaridades de cada uno de sus motores. Esa información se incorpora a la simulación, lo que permite que esta modelice el robot de manera más precisa y, por tanto, genere habilidades mejoradas para transferirlas de nuevo al robot.

En los experimentos, ANYmal superó en un 25 por ciento su propio récord de velocidad, según anunciaron los investigadores el pasado enero en *Science Robotics*. ANYmal también logró mantener el equilibrio cuando lo empujaban y levantarse tras ser volteado. El robot ha sido comercializado por ANYbotics, una empresa tecnológica de la ETH. Los motores de sus articulaciones poseen resortes similares a tendones que absorben los golpes, almacenan energía y proporcionan retroalimentación sensorial. Cada pata tiene tres motores, todos ellos intercambiables. Jemin Hwangbo, experto en robótica que ayudó a desarrollar el método de entrenamiento basado en las simulaciones, explica que la máquina fue creada para operaciones de rescate e inspecciones de plataformas petrolíferas. Puede subir escaleras y arrastrarse a través de túneles mientras transporta su pesado cerebro digital en su cuerpo a prueba de agua y polvo. Además, su vientre de kevlar, una fibra sintética, le permite sobrevivir a caídas de medio metro.



EL ROBOT de cuatro patas ANYmal, desarrollado por ANYbotics.

ANYBOTICS (WWW.ANYBOTICS.COM)

Otras compañías están desarrollando robots cuadrúpedos con facultades que rivalizan con las de ANYmal. En 2008, Boston Dynamics ganó notoriedad gracias a los cómicos —y perturbadores— vídeos de su ruidoso BigDog, un robot propulsado por gasolina que se abría paso por terrenos traicioneros. El más reciente SpotMini es su primo eléctrico de 25 kilos. Sangbae Kim, ingeniero mecánico del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) que no trabaja para Boston Dynamics, asegura que SpotMini disfruta del algoritmo más avanzado del mundo para sortear y salvar obstáculos. La compañía tiene previsto comenzar a venderlo este año para tareas que van desde la construcción hasta la asistencia domiciliaria. Un puerto situado en la parte superior permite que los usuarios acoplen herramientas, como un brazo de cinco kilos con el que la máquina puede traer bebidas o cargar el lavavajillas.

El equipo de Kim en el MIT ha construido un cuadrúpedo de 40 kilos llamado Cheetah 3, que, de acuerdo con el ingeniero, se mueve de manera más eficiente que los animales de cuatro patas de su mismo peso. Las articulaciones de la nueva máquina también son más potentes que las de cualquier otro robot con patas, añade. Fueron construidas desde cero y producen el mismo par motor que un automóvil. Cheetah 3 es capaz de regenerar energía y responde bien a los impactos, aunque no es tan rápido como su predecesor, Cheetah 2, que según Kim puede correr a 23 kilómetros por hora. A pesar de ello, puede realizar saltos mortales hacia atrás —al menos en teoría—, así como subir escaleras y obstáculos sin depender de la visión de una cámara. Pero no se entusiasme: ha sido construido con fines de investigación, así que no cuente con adoptar uno dentro de poco.

—Matthew Hutson

NEUROINGENIERÍA

Descifrar el habla

Un enfoque novedoso supone un avance hacia la traducción del pensamiento en lenguaje oral artificial

Los trastornos neurológicos que causan parálisis, como la esclerosis lateral amiotrófica y los accidentes cerebrovasculares que afectan al tronco encefálico, arrebatan a los afectados la facultad del habla. Las técnicas asistenciales dotan a algunos pacientes de control a través de un teclado (como al célebre físico Stephen Hawking), en tanto que las interfaces cerebro-ordenador posibilitan a otros el control mental de máquinas. Pero ambos tipos de aparatos son lentos y nada prácticos para las personas con síndrome de enclaustramiento y otros trastornos de la comunicación.



THOMAS FUCHS (*ilustración*); JORDI SABATER PI/CRAI/UB/MUSEO DE HISTORIA DE CATALUÑA (*dibujos de primates*)

En este momento se están desarrollando instrumentos destinados a captar la actividad cerebral ligada al habla, con el objetivo de descifrarla y convertirla en palabras que sean pronunciables por un sintetizador de voz. Un estudio reciente ha cosechado algunos de los resultados más impresionantes hasta la fecha gracias a técnicas de aprendizaje automático y síntesis vocal de vanguardia.

El ingeniero eléctrico Nima Mesgarani, del Instituto Zuckerman de la Universidad de Columbia, y sus colaboradores estudiaron a cinco epilépticos a los que se les había implantado electrodos en el cerebro como parte de su tratamiento. Estos abarcaban regiones involucradas en el procesamiento de los sonidos vocales. Los pacientes escucharon relatos en voz alta al tiempo que se registraba su actividad cerebral. El equipo entrenó una red neuronal de «aprendizaje profundo» para que emparejara esa actividad con la grabación de voz. El experimento decisivo era ver si, ante unos datos neuronales que no hubiera procesado antes, el sistema sería capaz de reproducir el discurso original.

Cuando los pacientes oyeron los números del cero al nueve recitados cuatro veces, el sistema transformó los datos neuronales en los valores necesarios para accionar un «vocoder», un tipo especial de analizador y sintetizador de voz. Otro grupo de participantes escuchó las palabras sintetizadas y las reconoció correctamente el 75 por ciento de las veces, según el estudio, que vio la luz este pasado enero en *Scientific Reports*. La mayoría de los intentos precedentes no habían medido el grado de comprensión del habla reconstruida. «Hemos comprobado que resulta inteligible», explica Mesgarani.

Ya era sabido que es posible reconstruir lo hablado a partir de la actividad cerebral, pero el nuevo trabajo supone un paso adelante hacia un rendimiento superior. «Aún queda mucho por mejorar, pero sabemos que la información está ahí», afirma el neurocirujano Edward Chang, de la Universidad de California en San Francisco, ajeno al estudio. «Y mejorará aún más en los próximos años, pues este es un campo en que se está avanzando con rapidez.»

Con todo, hay ciertas limitaciones. El equipo de Mesgarani registró la actividad cerebral de las regiones receptoras del habla, no de las implicadas en la emisión; además, pusieron a prueba su sistema con un pequeño conjunto de palabras, en lugar de frases enteras que contuvieran un vocabulario amplio. (Otros especialistas, como el mismo Chang, ya andan bregando con esos problemas.) Y, quizá lo más importante, el estudio se concibió para descifrar la actividad asociada al lenguaje oral que se escucha, no al que piensa uno mismo, una proeza que exigirá crear un aparato que resulte práctico. «El desafío para todos estriba en pasar del habla real a la imaginada», asegura Mesgarani.

—Simon Makin

AGENDA

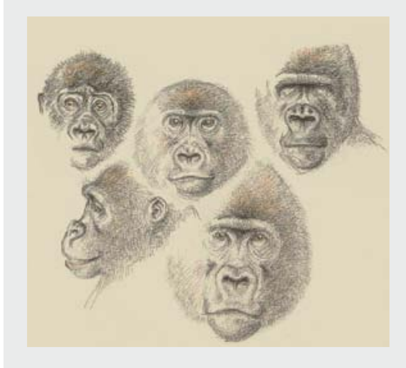
CONFERENCIAS

8 de mayo
De la revolución industrial a los grandes retos en la actualidad
Jesús Román Martínez, Universidad Complutense de Madrid
Del ciclo «Dieta y evolución cultural»
Museo Arqueológico Nacional
Madrid
www.man.es

22 de mayo
Humanos 2.0: La genética del s. xxi
Gemma Marfany, Universidad de Barcelona
Organiza: Revista Mètode
Centro Cultural La Nau
Valencia
metode.es

EXPOSICIONES

Hasta el 19 de mayo
El arte de la ciencia: Jordi Sabater Pi
Museo de Historia de Cataluña
Barcelona
www.mhcat.cat



OTROS

Hasta el 10 de mayo — Concurso
La ciencia y tú
Relatos breves sobre la llegada a la Luna
Organiza: Museo de la Ciencia de Valladolid
www.museocienciavalladolid.es

11 y 12 de mayo — Jornadas
Geolodia 19
Jornadas divulgativas de geología
Organiza: Sociedad Geológica de España
Todas las provincias españolas y Andorra
geolodia.es

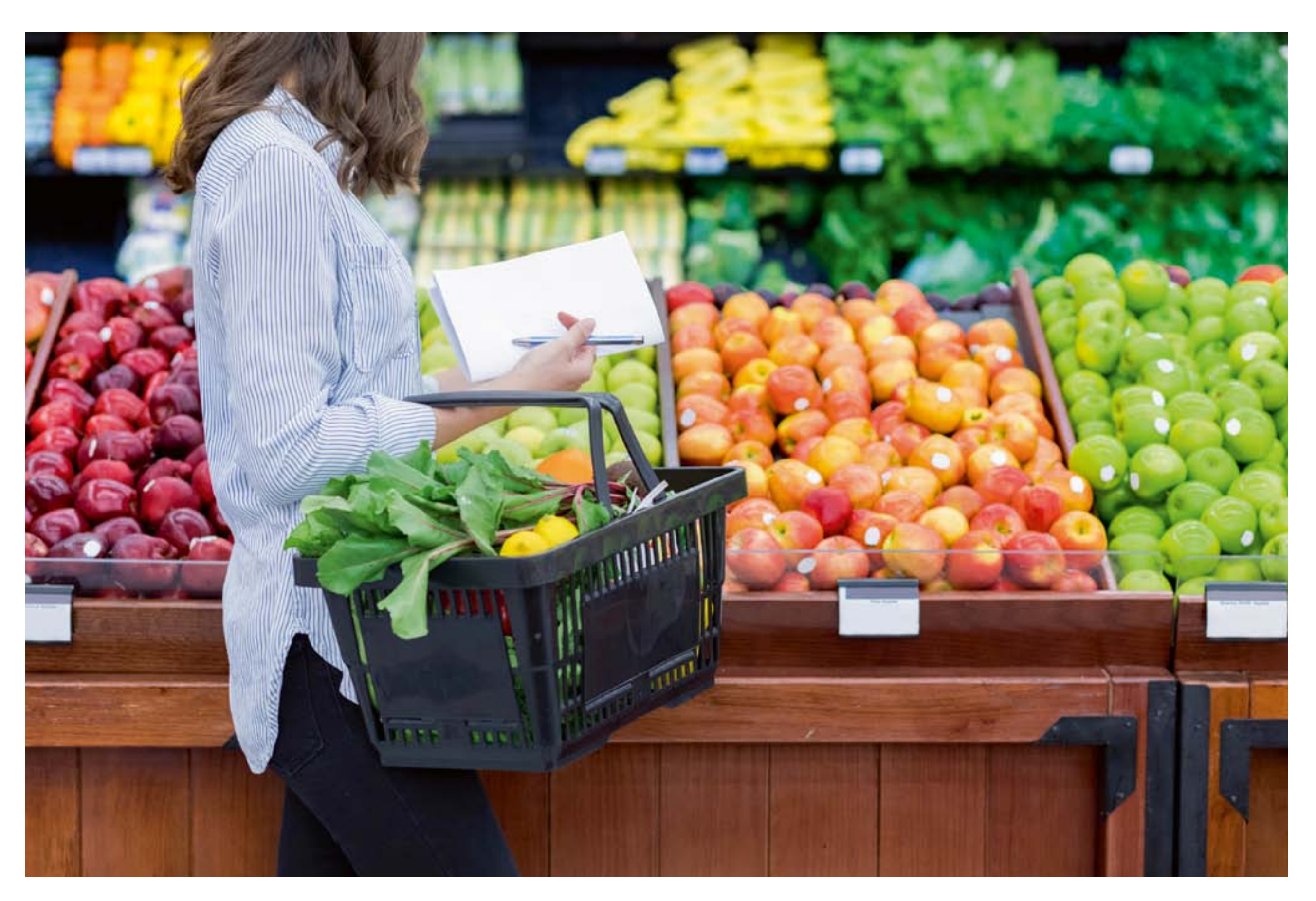
21 de mayo — Jornada
Día Mundial de la Metrología
Organiza: Sociedad Catalana de Tecnología
Centro de Cultura Contemporánea
Barcelona
www.cccb.org

SOSTENIBILIDAD

Impacto ambiental de la importación de frutas y verduras

La sobreexplotación de los recursos hídricos en España avalaría en algunos casos la sustitución de los productos locales por otros importados

MARÍA ÁNGELES TOBARRA GÓMEZ Y LUIS ANTONIO LÓPEZ SANTIAGO



EL CONSUMO DE FRUTAS Y VERDURAS producidas localmente no siempre resulta beneficioso para el ambiente, sobre todo cuando los productos no son de temporada.

«Besarte es como comer naranjas en agosto y uvas en abril». En 1988, la canción *Sabor de amor* del grupo Danza Invisible sugería que comer frutas que no fueran de temporada era un placer prohibido. Treinta años después, los consumidores hallamos durante todo el año en las fruterías y los supermercados una extensa variedad de frutas y verduras, sean locales o importadas, de forma que el concepto de producto de temporada ha empezado a diluirse.

Al mismo tiempo, en los últimos años ha crecido la preocupación de los consumidores por conocer y minimizar los impactos ambientales y sociales asociados a los bienes y servicios que compran. Los mecanismos de certificación social y ambiental, como la del comercio justo, de la Organización Mundial del Comercio Justo, la etiqueta ecológica de la Unión Europea o la de agricultura ecológica europea, se han creado para que los consumidores dispongan de información sobre cuáles son las empresas más responsables con el entorno y los productos que menos lo perjudican.

Los eslóganes que promueven el consumo local y de temporada han ido calando progresivamente en nuestra sociedad. El del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, «Fruta y verdura de aquí y de ahora», pretende fomentar varias conductas o prácticas: comer sano, favorecer el desarrollo de proximidad y reducir los impactos ambientales asociados al transporte y al uso intensivo de energía, agua o fertilizantes.

Sin embargo, el consumo local no siempre supone un menor impacto ecológico. Si las frutas y las verduras importadas por España son de temporada en el país de procedencia (uvas de Argentina en abril), o si ese país dispone de una dotación de recursos más abundante (agua,

tierra u horas de sol) o utiliza técnicas de producción menos intensivas (que explotan menos recursos) o que generan menos desechos (por ejemplo, CO_2), puede suceder que las importaciones provoquen un menor impacto ambiental que la producción local.

Para conocer el impacto global que ejerce nuestro país, en un trabajo reciente publicado en *Enviromental Science and Technology*, hemos evaluado cómo se verían afectados el consumo de agua y las emisiones de carbono a escala mundial si las familias españolas decidieran sustituir las frutas y las verduras frescas importadas por otras de producción nacional. En la práctica, ello implicaría que, para un mes concreto, por ejemplo noviembre, las familias dejarían de comprar piñas de Costa Rica y en su lugar adquirirían mandarinas o caquis producidos en Valencia. Al contrario de lo que se podría pensar, nuestros datos apuntan a que ese cambio de conducta no siempre resultaría beneficioso para el ambiente.

Las huellas del consumo

El concepto de huella ecológica se ha consolidado como una medida de referencia a la hora de evaluar los impactos ambientales asociados al consumo final de una población. Representa la carga mundial, debido al uso de agua y a la emisión de dióxido de carbono, que se genera a lo largo de toda la cadena de producción para suministrar los bienes y los servicios finales.

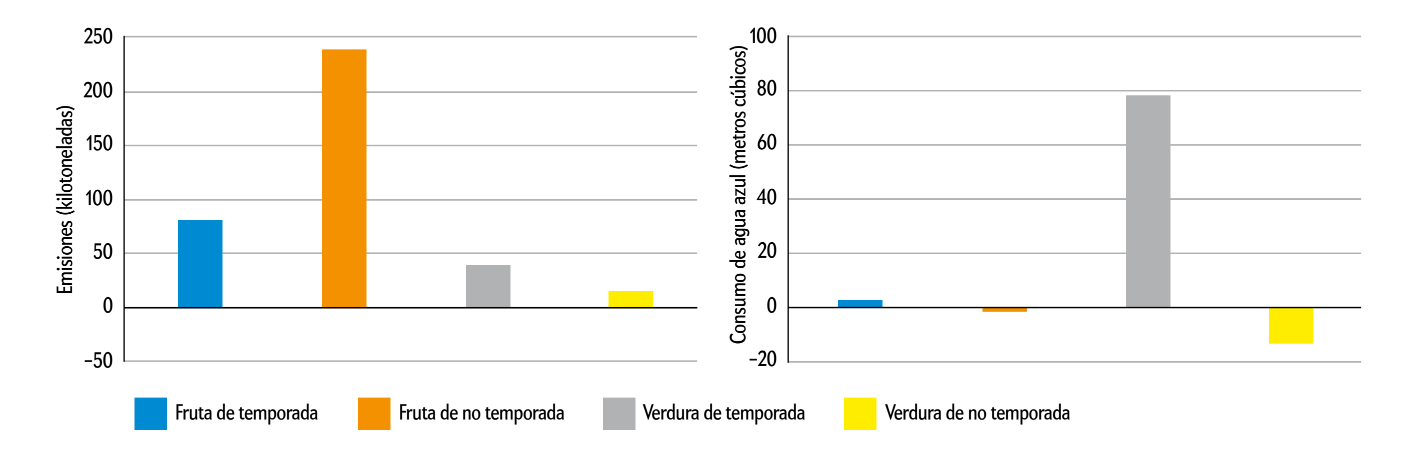
En la economía española, la huella de carbono asociada al consumo de frutas y verduras corresponde a las emisiones directas e indirectas necesarias para producir esas mercancías. Considera, entre otras, las emisiones derivadas de la fabricación y empleo de los abonos agrícolas o el plástico para los invernaderos, de la electricidad usada en el riego, o del transporte de los productos hasta la frutería. La huella hídrica tiene en cuenta el agua que consumen los cultivos, tanto la que aprovechan de la lluvia, denominada agua verde, como la superficial (ríos y embalses) o subterránea que se utiliza para el riego, denominada en conjunto agua azul.

Los resultados de nuestro trabajo muestran que el sector agrario español es altamente eficiente en términos ambientales por lo que respecta a la producción anual de frutas y verduras.

Así, la sustitución de los productos importados por españoles reduciría la huella de carbono y de agua en numerosos casos, especialmente para los productos procedentes de África, Asia y Oriente Medio. Las frutas de temporada procedentes de esas tres regiones conllevan un consumo global de agua azul de 37,69 miles de metros cúbicos (Mm^3) de más, puesto que estas zonas presentan una mayor carestía de agua superficial y subterránea que nuestro país. Sin embargo, esta cifra se vería compensada por el ahorro de 39,15 Mm^3 asociados a las importaciones de otras regiones, como Brasil o Francia, zonas que disponen de una mayor cantidad de agua superficial y subterránea para el riego que España. Al comparar el impacto conjunto que tendría la sustitución de frutas y verduras importadas de todos los países por la producción agraria española, obtenemos una huella que, en términos de agua, corresponde a un ahorro de un 2,4 por ciento.

Al centrar la atención en regiones concretas, nuestro estudio permite matizar los resultados. En las importaciones procedentes de Latinoamérica, se observan tendencias contrarias para la huella de agua azul y la de carbono. Por un lado, las frutas y las verduras importadas de ese continente, sean o no de temporada, consumen menos agua que si estas se produjeran en España, por lo que la huella hídrica global es negativa (se ahorra agua). En cambio, la huella de carbono para esos productos es positiva, en primer lugar, porque las prácticas de cultivo y producción son más intensivas allí (consumen más CO_2) que en España y, en segundo lugar, porque incorporan las emisiones asociadas al transporte internacional de mercancías.

Si nos fijamos en otro grupo de países, como Francia y Portugal, las importaciones suponen tanto un ahorro en la huella de carbono como en la del agua y, por ello, su sustitución por frutas y verduras españolas sería perjudicial. El hecho de que la huella de carbono de las hortalizas francesas sea menor se debe, entre otras cosas, a que en ese país gran parte de la electricidad se produce con fuentes de energía no fósiles, de modo que la empleada en el riego de los cultivos, por ejemplo, incorpora pocas emisiones de CO_2 a la huella de carbono.



BALANCE ENTRE LAS HUELLAS DE PRODUCTOS IMPORTADOS Y LOS LOCALES. La diferencia entre las emisiones anuales de CO_2 asociadas a la importación de frutas y verduras y las asociadas a su producción en España (*izquierda*) muestra una huella positiva en todos los casos (se consume más carbono con las importaciones), especialmente para la fruta que no es de temporada. Esa diferencia calculada para el uso del agua (*derecha*) en algunos casos es negativa: si las frutas y las verduras que no son de temporada se importan, globalmente se ahorra agua.

Variaciones mensuales

Al evaluar el consumo por meses, nuestra investigación diferencia entre productos de temporada y no temporada. Los resultados muestran cómo la agricultura de temporada española es muy eficiente en el uso de agua y las emisiones de carbono, con un menor impacto ambiental que las importaciones durante casi todos los meses del año. Puede afirmarse así que el consumo de frutas y verduras locales y de temporada es una conducta que tiene un efecto doblemente positivo, ya que permite reducir a la vez la huella de carbono y la de agua.

Sin embargo, cuando los españoles consumen productos locales que no son de temporada (por ejemplo, judías verdes, remolachas o espárragos verdes producidos en invernadero en España en el mes de enero), en lugar de importarlos de otros países, el resultado es un aumento generalizado de la huella de agua y, en algunos meses, también de la de carbono. De este modo, los ahorros asociados a las importaciones de verduras de no temporada son de 3,3 kilotoneladas de CO_2 de enero a marzo y de 7,3 Mm^3 de agua azul en el mismo período. Para todo el año, las importaciones de verduras de no temporada conllevan un ahorro de 13,4 Mm^3 de agua azul, como consecuencia, sobre todo, de la sobreexplotación de recursos hídricos que tiene lugar en los meses de verano en España. Para las frutas de no temporada importadas, como las piñas de Costa Rica y los melones de Brasil, también se dan ahorros netos en agua azul, aunque resultan menos importantes que los de las verduras.

En conclusión, un eslogan que recogiera este resultado podría ser: «Si consumes frutas y verduras de no temporada, impórtalas de otros países. El agua del planeta te lo agradecerá». Sobre todo, si las importaciones son de productos básicos, como las patatas de Francia, que permiten importantes ahorros de agua.

La decisiones de los consumidores pueden estimular los necesarios cambios productivos que han de introducirse en el sector agrario español para minimizar su impacto ambiental. Sin embargo, como recientemente muestra el trabajo liderado por Joseph Poore, de la Universidad de Oxford, el hecho de que el impacto pueda variar hasta 50 veces entre los productores de los mismos alimentos brinda importantes oportunidades de mitigación a lo largo de las cadenas globales de la producción. La responsabilidad de los consumidores en el proceso es limitada y tiene que ser compartida entre todos los agentes implicados (instituciones, distribuidores, suministradores) y diferenciada en función de la capacidad económica y legislativa de cada uno.

M.ª Ángeles Tobarra Gómez
y Luis Antonio López Santiago
son profesores de la Universidad de Castilla-La Mancha y miembros del Grupo de Investigación en Economía Energética y Ambiental (GEAR).

PARA SABER MÁS

Effect of eating seasonal on the carbon footprint of Swedish vegetable consumption. E. Röös y H. Karlsson en *Journal of Cleaner Production*, 59, 63-72, 2013.

Is seasonal households' consumption good for the nexus carbon/water footprint? The Spanish fruits and vegetables case. M. A. Tobarra, et al. en *Environmental Science & Technology*, 2018.

Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. J. Poore y T. Nemecek en *Science*, 360, (6392), págs. 987-992, 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Aprovechamiento agrícola del agua. Sandra Postel en *IyC*, abril de 2001.

Importación y exportación del agua. Mark Fischetti en *IyC*, abril de 2013.

La humanidad consume más agua de la que se creía. Fernando Jaramillo en *IyC*, agosto de 2016.

Comer hasta desecarnos. Maite M. Aldaya en *IyC*, octubre de 2017.

QUÍMICA

Disputas en la tabla periódica

Los científicos están cambiando las reglas que permiten añadir nuevos elementos a raíz de los problemas habidos con las cuatro últimas incorporaciones

EDWIN CARTLIDGE



A BOMBO Y PLATILLO se anunció oficialmente en 2015 la incorporación de cuatro nuevos elementos a la tabla periódica. En 2016 se comunicaron sus nombres: nihonio (para el de número atómico 113), moscovio (115), teneso (117) y oganesón (118).

El estado de ánimo en el castillo de Bäckaskog, en el sur de Suecia, debería haber sido optimista cuando un grupo de químicos y físicos se reunió allí para un simposio, en mayo de 2016. El encuentro, patrocinado por la Fundación Nobel, ofreció a los investigadores la posibilidad de evaluar los esfuerzos globales para investigar los límites de la ciencia nuclear, y para celebrar la reciente incorporación a la tabla periódica de cuatro nuevos elementos. Sus nombres tenían que ser anunciados al cabo de unos días, lo que era un gran honor para los científicos y los países responsables de los descubrimientos.

A pesar de que muchos de los presentes estaban encantados con el desarrollo de este campo —y con los titulares que generaba—, un buen número de ellos mostraba una gran inquietud. Temían que hubiera fallos en la evaluación de los trabajos sobre los nuevos elementos y les preocupaba que las revisiones de esos descubrimientos hubiesen podido quedarse cortas. Algunos pensaban que no había suficientes pruebas para aceptar los elementos más controvertidos, los de número atómico 115 y 117. La integridad científica de la tabla periódica estaba en juego.

Hacia el final de la reunión, uno de los participantes pidió una votación a mano alzada sobre si debían o no anunciar los nombres de los elementos según estaba planeado. La petición revelaba la profunda preocupación de los asistentes. Numerosos investigadores votaron que se retrasara el anuncio, afirma Walter Loveland, químico nuclear de la Universidad Estatal de Oregón en Corvallis. Ello desencadenó una reacción inusitada en algunos de los investigadores rusos que habían encabezado los trabajos que dieron como resultado tres de los elementos. «Patearon y se fueron», recuerda Loveland. «Nunca había visto eso en una reunión de científicos.»

Con todo, los nombres de los elementos fueron comunicados poco después. El

nihonio (número atómico 113), el moscovio (115), el teneso (117) y el oganesón (118) se unieron a los 114 elementos descubiertos anteriormente como adiciones permanentes a la tabla periódica. Casi 150 años después de que Dmitri Mendeléyev soñara con esta estructura organizativa, se completó oficialmente la séptima fila de la tabla.

Sin embargo, el modo en el que acontecieron los hechos molestó profundamente a algunos científicos. Claes Fahlander, físico nuclear de la Universidad de Lund, confía en que los resultados experimentales respaldarán, al final, los anuncios del moscovio y el teneso. No obstante, mantiene que fue «prematuro» aprobar esos elementos. «Somos científicos», dice. «No nos valen las creencias, queremos pruebas.»

Mientras el mundo celebra en 2019 el Año Internacional de la Tabla Periódica, el debate sobre las cuatro últimas incorporaciones ha obligado a reformar el proceso de verificación de otros nuevos elementos en el futuro. Y la controversia ha puesto una nube de incertidumbre sobre la última fila de elementos: es posible que los órganos decisorios soliciten la reevaluación de algunos de los últimos descubrimientos.

Parte de la controversia proviene de una desavenencia entre algunos químicos y físicos sobre quiénes deberían ser los legítimos custodios de la tabla periódica. Históricamente, los químicos han ocupado este rol, porque fueron ellos quienes descubrieron, mediante técnicas químicas y a lo largo de siglos de trabajo, los elementos de origen natural.

Durante las últimas décadas, sin embargo, los físicos nucleares son los que han liderado la búsqueda de nuevos elementos, creándolos artificialmente haciendo chocar núcleos atómicos. Puede tardarse años en obtener un solo átomo de estos elementos superpesados, que son también notoriamente inestables, pues se rompen por desintegración radiactiva a veces en fracciones de segundo. Dado que los grupos compiten para ser los primeros en crear los nuevos elementos, cada vez se hace más difícil validar sus hallazgos.

Rivalidad entre hermanos

La responsabilidad de aprobar o rechazar nuevos elementos recae en dos organizaciones hermanas: la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC, por sus siglas en inglés) y la Unión Internacional de Física Pura y Aplicada (IUPAP). Desde 1999 se ha confiado en el juicio de un comité de expertos conocido como el Grupo de Trabajo Conjunto (Joint Working Party, JWP), presidido por Paul Karol, químico nuclear y profesor emérito de la Universidad Carnegie Mellon. Se reúne periódicamente para evaluar los hallazgos de nuevos elementos. El grupo en su última composición, formada por Karol y cuatro físicos, se reunió en 2012 y se disolvió en 2016.

Durante ese tiempo, el JWP atribuyó el mérito del descubrimiento de los elementos 115, 117 y 118 a una colaboración rusoestadounidense dirigida por el veterano físico nuclear Yuri Oganessian, del Instituto Conjunto para la Investigación Nuclear, en Dubna. Asimismo, atribuyó el hallazgo del elemento 113 a los investigadores del Centro Nishina de Ciencia basada en el Acelerador RIKEN, cerca de Tokio.

Las decisiones del JWP fueron anunciadas públicamente el 30 de diciembre del año 2015, cuando la IUPAC emitió un comunicado de prensa proclamando el descubrimiento de los cuatro nuevos elementos (que todavía no habían recibido su nombre oficial). Los responsables de la Unión dijeron que habían trabajado rápido para comunicar las decisiones. De hecho, hicieron el anuncio antes de que el comité ejecutivo de la Unión pudiera aprobar las conclusiones del JWP, tal como especifican las reglas publicadas por la Unión (pueden consultarse en el volumen 38 de *International Chemistry*, la revista de noticias de la IUPAC); esta aprobación tuvo lugar al mes siguiente. Y, lo que todavía resulta más polémico, dice el entonces presidente de la IUPAP, Bruce McKellar, de la Universidad de Melbourne, las propuestas del JWP ni tan siquiera habían sido mostradas a la IUPAP, que habría deseado haberlas visto antes.

Esa omisión agravó las tensiones preexistentes entre las dos organizaciones. Cecilia Jarlskog, física de la Universidad de Lund y presidenta de la IUPAP antes que McKellar, afirma que, durante años, la IUPAC ha dominado injustamente el proceso de asignación de los descubrimientos. (Karol explicó a *Nature* que, al preparar los informes del JWP, trabajó en contacto, casi de forma exclusiva, con la institución química.) Al expresar su frustración en la reunión de 2016 en Suecia, acusó a la IUPAC de intentar acaparar la atención anunciando el descubrimiento por su cuenta y argumentó que tan solo los físicos «son competentes» para evaluar los anuncios de nuevos elementos.

En esta ocasión, las tensiones entre las comunidades de físicos y de químicos se acentuaron por la crítica hacia el modo en que el JWP había evaluado los hallazgos de los elementos 115 y 117. El JWP apoyó las conclusiones del equipo que había descubierto estos elementos, el cual encontró que las cadenas de desintegración radiactiva de los elementos 115 y 117 encajaban de tal manera que reforzaban ambos hallazgos. Pero este tipo de análisis de «bombardeo múltiple» es especialmente complicado para los elementos de número atómico impar. Fahlander y sus colaboradores de la Universidad de Lund afirmaron que es bastante improbable que exista coincidencia en el caso del 115 y del 117 —una inquietud que se puso en conocimiento del JWP en febrero de 2015.

Robert Barber, miembro del comité y físico nuclear de la Universidad de Manitoba en Winnipeg, dice que, a pesar de que él y sus compañeros «estaban muy preocupados» por el tipo de prueba (bombardeo múltiple), concluyeron que no había alternativa y llegaron a un consenso sobre todas sus decisiones. Loveland también apoya la decisión general. E incluso si el último JWP se equivocó en algunos detalles, dijo, la historia muestra que es poco probable que sus decisiones sean revocadas.

Sin embargo, el físico nuclear Vladimir Utyonkov, de Dubna, apunta contra el JWP. A pesar de que no está de acuerdo con el argumento del grupo de Lund sobre el bombardeo múltiple y de que está seguro de que los descubrimientos de la colaboración rusoestadounidense son sólidos, mantiene que el comité carecía de expertos «de alto nivel» en síntesis de elementos pesados, y dice que sus informes preliminares contenían numerosos errores. Karol defiende el trabajo que él y sus colegas llevaron a cabo en el JWP, afirmando que intentaban atenerse a los criterios publicados que rigen el proceso de evaluación. En general, dice, «creo que el comité estaba extremadamente cómodo con su informe».

Pero parece que, en la reunión de 2016 en Suecia, la mayoría de los delegados fueron críticos con el JWP. David Hinde, físico nuclear de la Universidad Nacional de Australia en Canberra, preguntó a una cincuentena de los presentes si pensaban que las conclusiones del comité eran «científicamente satisfactorias».

Comenta que recibió muy pocas respuestas positivas.

Cuestión de evaluación

A pesar de esos problemas, la IUPAC y la IUPAP siguieron adelante en junio de 2016 y anunciaron los nombres de los cuatro nuevos elementos. McKellar admite que tenía dudas al respecto, pero dice que según la mayoría de los físicos y químicos que consultó, las conclusiones generales del JWP —si bien no todos los detalles de sus análisis— probablemente eran sólidas.

Jan Reedijk, entonces presidente de la división de química inorgánica de la IUPAC, explica que el anuncio inicial se hizo pronto para evitar filtraciones a la prensa y satisfacer las demandas de los laboratorios peticionarios, que estaban impacientes por dar la noticia. Para facilitarlo, dice, aprobó rápidamente las conclusiones del JWP en diciembre de 2015 en nombre de su división, después de que hubiesen sido revisados y aceptados para su publicación en la revista *Pure and Applied Chemistry* de la IUPAC. «Me pareció que se había hecho la revisión adecuada, así que di mi "sí" en menos de una hora.»

Sin embargo, no está claro si tuvo lugar una revisión verdaderamente independiente. Según el director ejecutivo de la unión química, Lynn Soby, antes de hacerse público, el trabajo del JWP se revisó en un proceso en dos etapas. Primero, sus conclusiones (sobre todo las vinculadas a los últimos descubrimientos) pasaron por la revisión de varios laboratorios, así como por otro revisor sugerido por uno de los laboratorios solicitantes. Después, los informes del JWP se mandaron a miembros del comité de terminología, nomenclatura y símbolos de la unión química.

Según Soby, el trabajo del comité fue verificar los errores de expresión y formato; dependía, por tanto, de los propios laboratorios proporcionar el análisis científico. Según ella, ese procedimiento fue adecuado, dado que son los laboratorios los expertos en este campo. Pero uno de esos investigadores, Utyonkov, creyó que la unión química había reclutado a 15 expertos independientes para hacer la revisión científica. Supuso que a él y a dos colegas de Dubna se les había pedido que comprobaran tan solo los hechos y las cifras que aparecían en los informes. «No entiendo cómo podemos ser considerados árbitros independientes», dice.

Pensándolo ahora, Jarlskog habría deseado que ella y el resto de la comunidad de físicos hubiesen prestado más atención a cómo se completó todo el proceso de evaluación, y en especial al arbitraje de las conclusiones del JWP. «Voy a tener pesadillas por lo negligentes que hemos sido.»

Para abordar las inquietudes planteadas, las dos instituciones han acordado nuevos procedimientos para evaluar cualquier futuro elemento. Según las reglas modificadas que se dieron a conocer en mayo de 2018 (pueden consultarse en go.nature.com/2ji1gv4), los presidentes de la IUPAC y la IUPAP tendrán ahora la posibilidad de revisar, independientemente, las conclusiones del JWP antes de anunciarlas de forma conjunta. Para ello deberán llevar a cabo un proceso de evaluación por pares independiente en paralelo al de la revista *Pure and Applied Chemistry*.

McKellar dice que los cambios tendrán un efecto positivo. «Las uniones internacionales han tejido una relación de confianza al trabajar juntas en esto», dice.

Pero esos cambios no satisfacen a algunos críticos como Jarlskog. «Simplemente, no creo que las nuevas reglas vayan a cambiar nada», vaticina.

Edwin Cartlidge, *periodista científico, escribe sobre física y astronomía.*

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 558, págs. 175-176, 2018. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2019

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Procedures for the naming of a new element. John Corish en *Chemistry International*, vol. 38, n.º 2, págs. 9-11, 2016.
Validation of new superheavy elements and IUPAC-IUPAP joint working group. Cecilia Jarlskoga en *EPJ Web of Conferences*, vol. 131, 2016.
Discovery of the elements with atomic numbers *Z*=113,115 and 117 (IUPAC Technical Report). Paul J. Karol et al. en *Pure and Applied Chemistry*, vol. 88, núm. 1-2, 2016.
A new assessment of the alleged link between element 115 and element 117 decay chains. Ulrika Forsberg et al. en *Physics Letters B*, vol. 760, págs. 293-296, 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

La isla de los pesos pesados. Christoph E. Düllmann y Michael Block en *IyC*, mayo de 2018.

GEOLOGÍA

¿Cómo se formaron los Andes?

Un nuevo método que ayuda a esclarecer la relación entre la tectónica de placas y la formación de montañas arroja luz sobre el nacimiento de la cordillera andina

DIETMAR MÜLLER



LOS ANDES (en la imagen, una región de la Patagonia chilena) se levantaron cuando una placa tectónica oceánica se hundió bajo el continente sudamericano. Un estudio de los fragmentos de placa actualmente sumergidos en el manto terrestre sugiere que dicho proceso fue discontinuo y más complejo de lo que se pensaba hasta ahora.

Los Andes constituyen la cadena montañosa más larga del planeta y la más elevada fuera de Asia. Esta cordillera se originó cuando una placa tectónica (la de Nazca, situada bajo las aguas del Pacífico oriental) se deslizó contra el continente sudamericano y se hundió bajo él, un proceso conocido como «subducción». Como consecuencia, la corteza continental experimentó una compresión y un engrosamiento graduales, los cuales acabarían dando lugar a la formación de los Andes. El levantamiento de la cordillera andina ha causado modificaciones en el clima, el paisaje y la biodiversidad. Sin embargo, nuestro conocimiento sobre el verdadero desencadenante de su formación todavía presenta lagunas. En un trabajo reciente, Yi-Wei Chen, Jonny Wu y John Suppe, de la Universidad de Houston, han propuesto un nuevo método para llenarlas.

¿Qué relación guarda la subducción con el nacimiento de la cordillera andina? La idea más arraigada sostiene que la subducción en el margen occidental de Sudamérica ha sido continua desde el Jurásico (hace entre 200 y 145 millones de años), si bien los Andes no habrían comenzado a elevarse hasta tiempos mucho más recientes. Las estimaciones sobre el momento de su origen van desde el Cretácico inferior (hace unos 130 millones de años) hasta el Cenozoico inferior (hace unos 50 millones de años). Pero, a pesar de esas discrepancias, los expertos coinciden en que fue la interacción entre las placas tectónicas subducidas y la parte más profunda del

manto terrestre lo que causó la elevación de la cordillera.

El trabajo de Chen y sus colaboradores pone en entredicho que el levantamiento andino ocurriese en el contexto de un sistema en subducción que estuvo activo durante largo tiempo. Los autores sugieren que, antes de la aparición de los Andes, existió un período en el que no se produjo subducción bajo la costa sudamericana, y que el inicio de la subducción resulta clave para entender el nacimiento de la cordillera. Tales conclusiones llegan gracias a un nuevo método para reconstruir la tectónica de placas pasada a partir de imágenes «tomográficas», obtenidas a partir de estudios de ondas sísmicas, de las placas sumergidas.

Subducción discontinua

En su trabajo, los autores observan que la placa de Nazca se hunde bajo Sudamérica hasta alcanzar profundidades de entre 1100 y 1300 kilómetros y que, después, presenta una interrupción: una región de manto que separa la placa de Nazca de otro fragmento subducido y situado a mayor profundidad. También se percataron de que, según un modelo de tectónica global publicado por nuestro grupo en 2016, la subducción bajo la costa sudamericana habría sido discontinua y que, hace entre 80 y 55 millones de años, habría presentado episodios en los que la placa oceánica en subducción se separó del continente. Aunque en su momento nosotros ya habíamos detectado esa peculiaridad del modelo, habíamos sido cautos a la hora de interpretarla, ya que en ella intervenían varios factores difíciles de cuantificar.

Al respecto, una de las principales incertidumbres guarda relación con el movimiento relativo de las partes oriental y occidental de la Antártida a lo largo del llamado Sistema de Rift de la Antártida Occidental: la región desde la que, en el pasado, los bloques tectónicos situados bajo ambas partes se separaron. Una buena porción de ese sistema se halla oculto bajo una gruesa capa de hielo continental, por lo que existen pocas pruebas directas del movimiento relativo entre ambos bloques, a excepción de desplazamientos ocurridos en los últimos 43 millones de años. Así pues, reconstruir la tectónica antártica en épocas anteriores obliga a basarse en indicios circunstanciales. Pero esto es importante si deseamos deducir la historia tectónica de los Andes: para modelizar los movimientos relativos pasados entre Sudamérica y las placas del Pacífico, resulta necesario entender los movimientos relativos entre la placa sudamericana y las de África, la Antártida y Farallón-Nazca, ya que su dinámica conjunta influye en la tectónica andina (la placa de Farallón subduce por debajo de las Américas y, como la de Nazca, se ha fragmentado en varias placas menores).

Chen y sus colaboradores demuestran con ingenio que los períodos en los que supuestamente se produjo la separación entre Sudamérica y la placa en subducción de Farallón-Nazca resultan compatibles con la extensión de los bloques subducidos en el manto inferior bajo Sudamérica, así como con la historia geológica de los Andes. Para poner a prueba su teoría, los autores han empleado un método computacional que simula la manera en que el fondo oceánico en subducción puede ser «extraído» del manto. Dicho método invierte el camino seguido por el material hundido y, en última instancia, devuelve las placas a la superficie.

Los resultados revelan que la subducción se inició hace unos 80 millones de años y que se propagó lentamente de norte a sur. La subducción a lo largo de todo el margen occidental de Sudamérica, tal y como se observa hoy, no se alcanzó hasta hace 55 millones de años. Los segmentos subducidos interaccionaron por primera vez con el manto inferior entre 10 y 30 millones de años después del inicio de la subducción. El nuevo modelo concuerda con la hipótesis de que los Andes comenzaron a formarse durante el Cenozoico y podría explicar la interrupción observada en la placa, la cual, según los autores, sería consecuencia de una reorganización del proceso de subducción ocurrida hace más de 80 millones de años. La reconstrucción de Chen y sus colaboradores indica también que el inicio de la subducción a lo largo del centro y el sur de Sudamérica daría cuenta tanto de esa pausa como del subsiguiente aumento del magmatismo ocurrido hace unos 80 millones de años.

Una nueva herramienta

Una cuestión abierta es cómo fue el proceso de subducción andina en épocas anteriores a los últimos 90 millones de años; desentrañarla será fundamental para entender las causas de la interrupción observada en la placa. Los datos sobre los fragmentos subducidos enterrados en las profundidades del manto (muy por debajo de los 1500 kilómetros) podrían servir para reducir las limitaciones de los modelos geodinámicos y tectónicos a escala local y global. También podrían clarificar el origen de la enigmática reorganización de las placas tectónicas que tuvo lugar hace entre 100 y 105 millones de años y que conllevó el fin de la subducción a lo largo de los márgenes orientales de Australia y la Antártida.

En principio, el nuevo método podría aplicarse a numerosos sistemas de subducción, en particular si tenemos en cuenta que las imágenes sísmicas del manto gozan hoy de una nitidez mayor y que se están usando cada vez más para esclarecer la evolución de regiones con una actividad tectónica compleja. Los recientes avances en métodos sísmicos y modelización terrestre facilitarán la obtención de imágenes del manto profundo, sobre todo en aquellas regiones donde las imágenes sísmicas no funcionan bien y donde escasean los instrumentos superficiales para obtenerlas. Cabe esperar que tales avances, combinados con una mejora de los modelos geodinámicos que incorporen imágenes sísmicas del manto, transformarán nuestro conocimiento sobre la evolución de la Tierra.

Dietmar Müller *investiga en la Escuela de Geociencias de la Universidad de Sídney.*

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 565, págs. 432-433, 2019. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2019

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Amazonia through time: Andean uplift, climate change, landscape evolution, and biodiversity. Carina Hoorn et al. en *Science*, vol. 330, págs. 927-931, noviembre de 2010.

Ocean basin evolution and global-scale plate reorganization events since Pangea breakup. Dietmar Müller et al. en *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 44, págs. 107-138, junio de 2016.

Southward propagation of Nazca subduction along the Andes. Yi-Wei Chen, Jonny Wu y John Suppe en *Nature*, vol. 565, págs. 441–447, enero de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

La superficie de la Tierra, expresión de su dinámica interna. Michael Gurnis en *IyC*, mayo de 2001.

ASTROFÍSICA

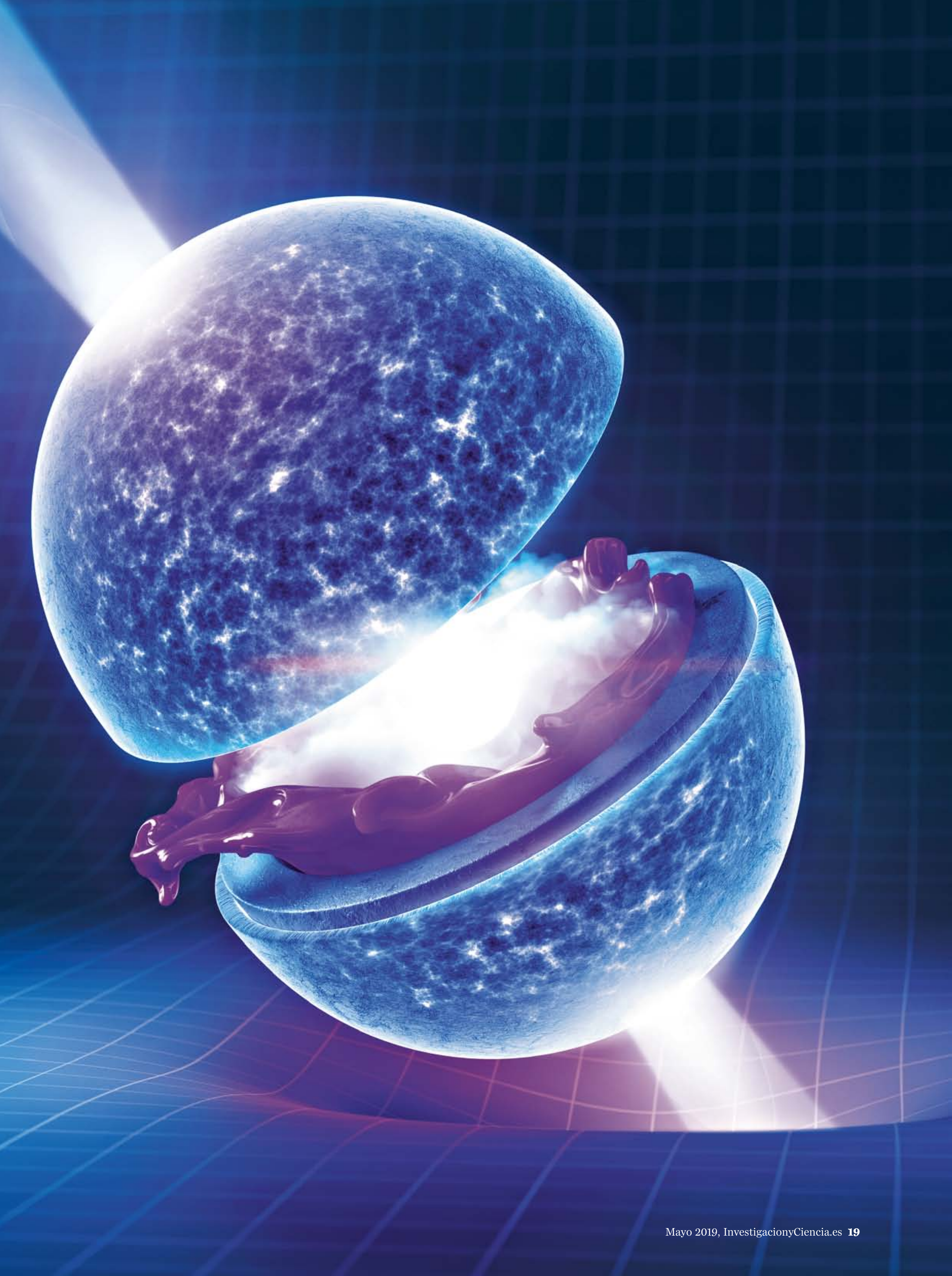
EL INTERIOR DE LAS ESTRELLAS DE NEUTRONES

En el seno de estos astros, las fuerzas nucleares y la gravedad operan en los límites de la física conocida. Varias observaciones recientes han abierto un nuevo camino para descifrar sus enigmas

Clara Moskowitz

Ilustración de FOREAL

Cuando una estrella veinte veces mayor que el Sol llega al final de su vida, se convierte, en palabras del astrofísico Zaven Arzoumanian, «en el objeto más extravagante del que nunca haya oído hablar la mayoría de la gente»: un astro del tamaño de una ciudad y con una densidad inverosímil conocido como estrella de neutrones. Un pedazo del tamaño de una pelota de ping-pong pesaría más de mil millones de toneladas. En el interior de la estrella, la enorme gravedad provoca que los protones se fundan con los electrones. Ello da lugar a un objeto compuesto en su mayor parte por neutrones, de ahí su nombre. Pero el asunto no está ni mucho menos zanjado: nadie ha visto de cerca una de estas estrellas, y ningún laboratorio terrestre puede crear nada remotamente cercano a tales densidades, por lo que su estructura interna sigue siendo uno de los mayores misterios de la astronomía. «Se trata de materia que ha alcanzado la mayor densidad estable que permite la naturaleza, en una configuración que no entendemos», continúa Arzoumanian, quien trabaja en el Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA. También se trata de la forma de materia con mayor atracción gravitatoria: si añadiésemos algo más de masa, el conjunto se convertiría en un agujero negro, cuyo interior no está hecho de materia, sino de puro espacio curvo. «Lo que tratamos de averiguar es qué sucede en ese límite», explica Arzoumanian.



Al respecto hay diferentes teorías. Algunas postulan que estos objetos constan de neutrones normales y quizá de algún que otro protón. Otras proponen alternativas mucho más extrañas. Quizá los neutrones se descompongan en sus partículas constituyentes, quarks y gluones, y estas naden libremente en un mar superfluido. O tal vez estas estrellas se compongan de materia aún más exótica, como hiperones, partículas que no constan de los quarks habituales *arriba* y *abajo*, sino de sus primos más pesados, los quarks *extraños*.

No hay una manera sencilla de dilucidar cuál de estas teorías es la correcta, pero en los últimos años se han hecho progresos. En agosto de 2017 se presentó una gran oportunidad: dos experimentos detectaron las ondas gravitacionales (perturbaciones del espaciotiempo producidas por la aceleración de objetos de gran masa) procedentes de lo que parecía ser una colisión de dos estrellas de neutrones. Esas ondas transportaban información sobre la masa y el tamaño de los objetos que chocaron. Gracias a ello, los astrónomos pudieron imponer nuevos límites a sus propiedades y a su posible composición.

Otras pistas proceden del Explorador de la Composición Interior de las Estrellas de Neutrones (NICER), un experimento que desde junio de 2017 opera en la Estación Espacial Internacional. NICER observa púlsares: estrellas de neutrones muy magnetizadas que rotan a gran velocidad y que emiten haces de radiación que barren el cielo. Debido a ello, desde la Tierra se ven como faros que se encienden y se apagan a un ritmo de cientos de veces por segundo. Gracias a estos y otros experimentos, los investigadores están hoy más cerca de averiguar qué esconde el interior de las estrellas de neutrones. Si lo logran, no solo habrán entendido un tipo de astro muy singular, sino también los límites fundamentales de la materia y de la gravedad.

MARES SUPERFLUIDOS

Las estrellas de neutrones son el remanente de explosiones de supernova: el colosal estallido que tiene lugar cuando una estrella de gran masa se queda sin combustible y deja de generar energía. Cuando eso ocurre, la gravedad no encuentra oposición y la estrella se derrumba sobre sí misma, expulsa sus capas externas y comprime el núcleo, que en ese momento se compone principalmente de hierro. La gravedad es tan intensa que, literalmente, aplasta los átomos: los electrones se funden con los protones y los transforman en neutrones. «El hierro se comprime 100.000 veces en cada dirección», explica Mark Alford, físico de la Universidad de Washington en San Luis. «Los átomos dejan de medir una décima de nanómetro y se convierten en un grumo de neutrones de pocos femtómetros de ancho» (un femtómetro es la millonésima parte de un nanómetro, que a su vez es la milmillonésima parte de un metro). Sería como comprimir la Tierra hasta dejarla del tamaño de una manzana de edificios. Una vez formada, la estrella cuenta con unos 20 neutrones por cada protón. James Lattimer, astrónomo de la Universidad de Stony Brook, apunta que se trata de algo muy parecido a un núcleo atómico gigantesco, aunque con una diferencia importante: «Los núcleos se mantienen unidos gracias a las interacciones nucleares; las estrellas de neutrones, gracias a la gravedad».



Clara Moskowitz es redactora sénior de *Scientific American* especializada en física y ciencias del espacio.

La existencia de las estrellas de neutrones fue propuesta en 1934 por los astrónomos Walter Baade y Fritz Zwicky como respuesta a la pregunta de qué podía quedar tras una explosión de supernova (término que acuñaron entonces para describir los estallidos extremadamente brillantes que se observaban en el firmamento). Solo habían pasado dos años desde que el físico británico James Chadwick descubriera el neutrón. Al principio, algunos se mostraron escépticos ante la posibilidad de que existieran tales objetos extremos. La idea no fue ampliamente aceptada hasta que Jocelyn Bell Burnell y sus colaboradores observaron los primeros púlsares en 1967 y, a lo largo del año siguiente, se determinó que tales astros debían ser estrellas de neutrones en rotación.

Los físicos creen que las estrellas de neutrones tienen una masa de entre 1 y 2,5 veces la del Sol, y que probablemente consten de al menos tres capas. La exterior sería una «atmósfera» gaseosa de hidrógeno y helio, con un espesor de entre pocos centímetros y algunos metros. Esa atmósfera flota sobre una «corteza» de aproximadamente un kilómetro de grosor, formada por núcleos atómicos dispuestos en estructura cristalina y entre los que hay electrones y neutrones. La tercera capa, la más interna, da cuenta de la mayor parte de la estrella y es la más misteriosa. En ella, los núcleos atómicos están tan apiñados como permiten las leyes de la física, sin ninguna separación entre sí. A medida que nos acercamos al centro, los núcleos contienen más y más neutrones. Llega un punto en que ya no pueden albergar más, por lo que «se desbordan»: ya no hay núcleos atómicos, solo nucleones (neutrones o protones). En la región más interna, estos también podrían desintegrarse. «Se trata de un régimen hipotético, ya que no sabemos qué ocurre a esas presiones y densidades demenciales», admite Alford. «Pensamos que los neutrones están tan apretados y superpuestos que, en realidad, ya no se puede hablar de un fluido de neutrones, sino de uno de quarks.»

No está claro qué forma adoptaría ese estado. Una posibilidad es que los quarks constituyan un superfluido: un fluido carente de viscosidad y que, en teoría, nunca deja de moverse una vez que comienza a hacerlo. Ese extraño estado de la materia se forma porque, a tales densidades, los quarks pueden agruparse en

EN SÍNTESIS

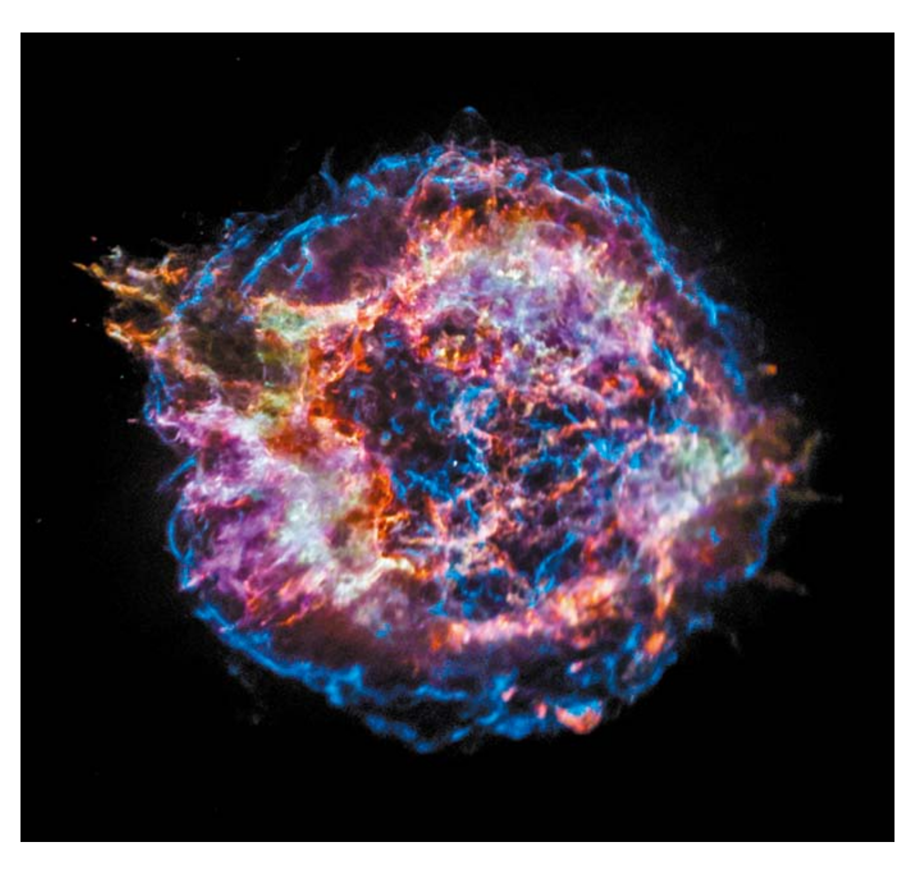
Las estrellas de neutrones son remanentes de explosiones de supernova. Con una masa similar a la del Sol y un radio de pocos kilómetros, constituyen la forma de materia más densa del universo conocido.

En su interior, la gravedad comprime los protones y los electrones hasta formar neutrones. Pero se ignora qué estado adoptan estos: ¿se organizan en un superfluido, carente de viscosidad, o se disgregan en sus quarks constituyentes?

La reciente detección de las ondas gravitacionales generadas por el choque de dos estrellas de neutrones y otros experimentos prometen allanar el camino para entender mejor estos enigmáticos objetos.

parejas llamadas «pares de Cooper». Los quarks son fermiones (partículas de espín semientero), pero cada uno de esos pares se comporta como un bosón (partículas de espín entero). Como consecuencia, su comportamiento cambia: los fermiones cumplen el principio de exclusión de Pauli, que afirma que dos fermiones idénticos no pueden encontrarse en el mismo estado cuántico. Los bosones, sin embargo, no se hallan sujetos a esa restricción. Si se comportan como fermiones, los quarks han de adoptar energías cada vez más elevadas para apilarse unos sobre otros. Pero, como bosones, pueden asentarse todos ellos en el estado de mínima energía. Cuando eso ocurre, los pares de quarks forman un superfluido.

Fuera de la parte más densa del núcleo de la estrella, los neutrones probablemente permanezcan intactos. Pero también estos pueden formar parejas y dar lugar a un superfluido. De hecho, los científicos están bastante seguros de que eso es lo que sucede con algunos de los neutrones de la corteza. Los indicios al respecto proceden de la observación de lo que los expertos llaman «fallos» (*glitches*) en los púlsares: momentos en los que la estrella se acelera bruscamente. Se cree que eso ocurre cuando la velocidad de giro del astro deja de estar sincronizada con la del superfluido presente en la corteza. Con el paso del tiempo, la rotación de la estrella se va frenando de manera natural. Pero la del superfluido —que se mueve sin rozamiento— no. Cuando la diferencia entre ambas velocidades crece demasiado, el superfluido cede momento angular. «Es como un terremoto», explica Lattimer. «Hay una sacudida y una explosión de energía, y la frecuencia de rotación aumenta durante un tiempo para, después, regresar al valor previo.»



CASIOPEA A es el remanente de una antigua explosión de supernova. En su centro hay una estrella de neutrones cuyo núcleo podría estar transformándose en un superfluido.

NASA, CXC Y SAO

En 2011, Lattimer y sus colaboradores obtuvieron posibles indicios de la existencia de un superfluido en el núcleo de una estrella de neutrones, si bien el propio Lattimer admite que se trata de un hallazgo controvertido. Su equipo, liderado por Dany Page, de la Universidad Nacional Autónoma de México, estudió 15 años de observaciones en rayos X de Casiopea A, el remanente de una explosión de supernova que pudo verse desde la Tierra en el siglo xvii. Los científicos hallaron que el púlsar que se encuentra en el centro de esta nebulosa se estaba enfriando más de lo que debería según la teoría tradicional. Una posible explicación es que muchos de los neutrones del interior del astro estén formando pares y dando lugar a un superfluido. Esos pares se rompen y vuelven a formarse, un proceso que emite neutrinos y que causa que la estrella pierda energía y se enfríe. «Nunca pensamos que veríamos algo así», señala Lattimer. «Pero he aquí una estrella con la edad adecuada para observarlo. La prueba de fuego vendrá dentro de otros cincuenta años, cuando debería empezar a enfriarse más despacio, ya que, una vez formado el superfluido, ya no queda energía adicional de la que desprenderse.»

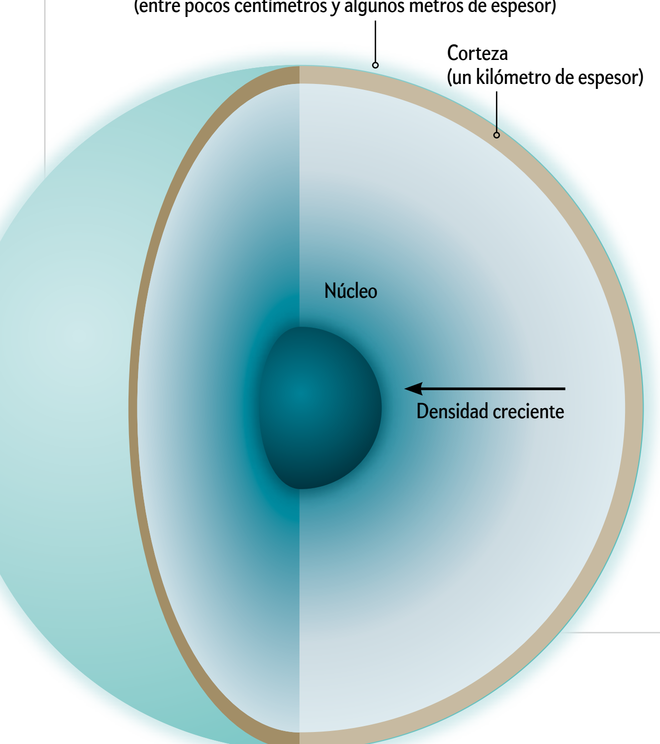
QUARKS EXÓTICOS

Pero los superfluidos no son más que una posibilidad. Otra es que las estrellas de neutrones alberguen quarks exóticos. Existen seis tipos, o «sabores», de quarks: *arriba*, *abajo*, *encanto*, *extraño*, *cima* y *fondo*. Solo los dos más ligeros, *arriba* y *abajo*, están presentes en los átomos. El resto son tan masivos e inestables que únicamente aparecen como residuos de vida corta en las colisiones que se llevan a cabo en los aceleradores de partículas, como el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN. No obstante, en el denso interior de las estrellas de neutrones, algunos de los quarks que componen los neutrones podrían transformarse en quarks *extraños* (los otros sabores poco comunes, *encanto*, *cima* y *fondo*, son tan masivos que es probable que no puedan formarse ni siquiera allí). Si se crean quarks *extraños* y permanecen ligados a los otros quarks, darían lugar a ciertos «neutrones mutantes» conocidos como hiperones. Otra posibilidad es que esos quarks no queden confinados en el interior de ninguna partícula, sino que vaguen libremente en una especie de «sopa» de quarks.

Cada una de esas opciones debería dar lugar a estrellas de neutrones de distinto tamaño. Si en el núcleo de la estrella hubiera neutrones intactos, estos actuarían «como canicas», en palabras de Arzoumanian, y harían que el núcleo fuese duro y sólido. Ello tendería a empujar las capas externas, lo que aumentaría el tamaño de la estrella. Por el contrario, si los neutrones se disolvieran en una sopa de quarks y gluones, la estrella sería «más blanda» y de menor tamaño, añade. Arzoumanian es uno de los investigadores principales del experimento NICER, que pretende determinar cuál de esas alternativas

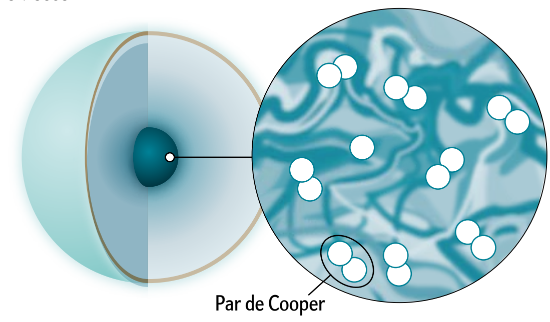
Interior enigmático

Las estrellas de neutrones poseen una tenue atmósfera gaseosa y, bajo ella, una corteza formada por núcleos atómicos pesados y algunos electrones. Tras estas finas capas se esconde el núcleo del astro: una zona seguramente compuesta en su mayor parte por neutrones. Sin embargo, sigue sin estar claro qué estado adoptan estos neutrones y si, en la región más densa del núcleo, sus partículas constituyentes (quarks y gluones) experimentan cambios.



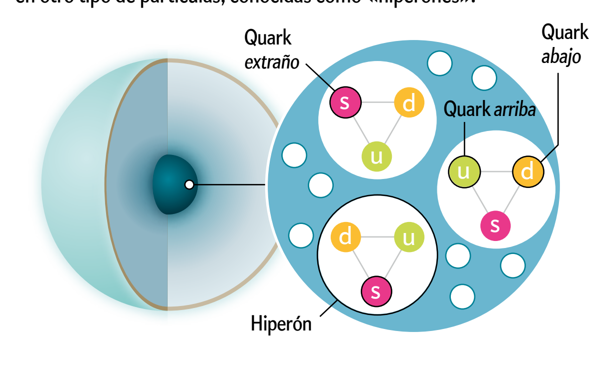
Hipótesis 1: Estado superfluido

Las partículas del núcleo interno podrían hallarse tan comprimidas que algunas de ellas formarían «pares de Cooper». Eso puede suceder con los protones, los neutrones o, si estas partículas se han dividido, con sus quarks constituyentes. Ello daría lugar a un estado superfluido, carente de viscosidad.



Hipótesis 2: Quarks exóticos

La enorme densidad del núcleo interno podría hacer que algunos de los quarks *arriba* y *abajo*, componentes del neutrón, se transmutasen en quarks *extraños*. En tal caso, los neutrones se transformarían en otro tipo de partículas, conocidas como «hiperones».



es la correcta: «Uno de los principales objetivos de NICER es medir la masa y el radio [de las estrellas de neutrones], lo que nos ayudará a confirmar o descartar ciertas teorías sobre la materia densa».

NICER consta de una caja del tamaño de una lavadora montada en la Estación Espacial Internacional. Observa de manera constante varias decenas de púlsares y detecta los rayos X que emiten. Mide el tiempo de llegada y la energía de los fotones, así como la forma en que el campo gravitatorio de la estrella desvía su propia luz. Ello permite calcular la masa y el radio de cada púlsar y compararlos. «Si NICER encontrase estrellas con masas prácticamente iguales y radios muy distintos, significaría que hay algo extraño, alguna nueva forma de materia que hace que las estrellas se contraigan», explica Alford. Una transición de ese tipo podría ocurrir, por ejemplo, cuando los neutrones se disgregan en quarks y gluones.

Medir el tamaño de las estrellas de neutrones aporta un buen método para acotar las posibles formas que puede adoptar la materia en su interior. Hasta hace poco, se pensaba que la mitad de los neutrones de estos objetos se convertirían en hiperones. Según los cálculos, una estrella de tales características no podría superar las 1,5 masas solares. En 2010, sin embargo, un equipo dirigido por Paul Demorest, del Observatorio Nacional de Radioastronomía de EE.UU., encontró una estrella de neutrones con una masa 1,97 veces mayor que la del Sol. Ello permitió descartar varias teorías relativas a su interior. Hoy, los físicos estiman que los hiperones no pueden dar cuenta de más del 10 por ciento de la masa de estos astros [*para otros resultados recientes al respecto, véase* «Un púlsar de 2,3 masas solares», por Manuel Linares, Tariq Shahbaz y Jorge Casares; Investigación y Ciencia, febrero de 2019].

COLISIONES DE ESTRELLAS

Aunque estudiar estrellas de neutrones individuales resulte muy informativo, puede aprenderse mucho más cuando dos de ellas chocan. Hacía años que los astrónomos llevaban detectando ciertos destellos de luz, conocidos como estallidos de rayos gamma, que atribuían a colisiones de estrellas de neutrones. En 2017, las ondas gravitacionales permitieron confirmar por primera vez la fusión de dos de estos objetos.

El 17 de agosto de ese año, dos experimentos, el Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO), en EE.UU., y Virgo, en Italia, detectaron simultáneamente las perturbaciones gravitatorias producidas por dos estrellas de

NIGEL HAWTIN

neutrones mientras caían en espiral una hacia otra y se fusionaban para dar lugar a otra estrella de neutrones o un agujero negro. Aunque no se trataba de la primera observación de ondas gravitacionales, todos los casos previos habían correspondido a colisiones de agujeros negros. Además, esa fue también la primera vez que se detectaron ondas gravitacionales y luz procedentes del mismo lugar del cielo al mismo tiempo. Ello proporcionó una gran cantidad de información sobre el fenómeno, que resultó ser una bendición para la física de las estrellas de neutrones.

Los astrofísicos determinaron que las ondas gravitacionales provenían de dos estrellas de neutrones situadas a unos 130 millones de años luz de la Tierra. Sus propiedades (frecuencia, amplitud y patrón temporal) permitieron calcular que, antes del choque, cada astro tenía una masa 1,4 veces mayor que la del Sol y un radio de entre 11 y 12 kilómetros. Tales datos ayudarán a los científicos a encontrar una expresión clave en la física de las estrellas de neutrones: su ecuación de estado. Esta describe la densidad de la materia a diferentes presiones y temperaturas, y debería ser aplicable a todas las estrellas de neutrones del universo. Se han propuesto distintas variantes, correspondientes a diferentes configuraciones de la materia contenida en estos objetos, y las nuevas mediciones ofrecieron la oportunidad de descartar algunas. El hecho de que los astros que chocaron fueran relativamente pequeños, por ejemplo, causó sorpresa. Algunas teorías tienen dificultades para encajar estas estrellas de neutrones compactas y otras más masivas, como la gigante de 1,97 masas solares, en la misma ecuación de estado fundamental. «Estas observaciones están empezando a dibujar el intrincado camino que debe recorrer nuestra ecuación de estado», apunta Jocelyn Read, astrofísica de la Universidad Estatal de California y colíder del equipo Materia Extrema de LIGO. «La formación de estrellas compactas y la estabilidad de las estrellas masivas están convirtiéndose en retos para la teoría. Es ciertamente interesante y podría llegar a serlo aún más.»

Hasta ahora, LIGO y Virgo solo han detectado una colisión de estrellas de neutrones, pero la siguiente podría llegar en cualquier momento. «Llevo tanto tiempo trabajando en este campo que es fantástico dejar atrás la era de las especulaciones: "Si pudiéramos detectar ondas gravitacionales podríamos hacer esto y aquello". Ahora tenemos la oportunidad, y no hemos hecho más que empezar», explica Read.

LOS LÍMITES DE LA MATERIA

Con el tiempo, conforme aumente la sensibilidad de los detectores de ondas gravitacionales, la recompensa podría ser enorme. Una manera de investigar qué hay en el interior de una estrella de neutrones consiste en buscar las ondas gravitacionales emitidas por el fluido que gira en su centro. Si este carece de viscosidad, como ocurre en un superfluido, o si esta es muy baja, podría comenzar a moverse siguiendo ciertas pautas, conocidas como «modos *r*», que emitirían ondas gravitacionales. «Esas ondas serían mucho más débiles que las generadas en una fusión», aclara Alford. «Estamos hablando de materia que "chapotea", no de materia destrozada.» Alford y sus colaboradores han concluido que, en su configuración actual, LIGO no podrá detectar tales ondas. Sin embargo, estas sí deberían aparecer en las futuras versiones mejoradas de LIGO y en otros experimentos, como el Telescopio Einstein, un proyecto europeo en fase de estudio.

Descifrar el misterio de las estrellas de neutrones revelaría cómo se comporta la materia bajo condiciones apenas comprensibles, en un estado tan alejado de los átomos de nuestro mundo que toca los límites de lo posible. Algunas hipótesis peculiares podrían verse confirmadas, como la materia de quarks, los neutrones superfluidos o las extravagantes estrellas de hiperones. Y, en última instancia, los físicos aspiran a usar las estrellas de neutrones para abordar cuestiones más generales, como las leyes que gobiernan las interacciones nucleares (la complicada danza entre protones, neutrones, quarks y gluones) o el mayor misterio de todos: la naturaleza de la gravedad.

Las estrellas de neutrones constituyen una herramienta más para investigar las fuerzas nucleares. Al mismo tiempo, los investigadores usan los aceleradores de partículas a modo de «microscopios» que permiten avistar en el interior de los nucleones. Y cuando entiendan mejor su física, podrán centrarse en la gravedad. «Las estrellas de neutrones son una mezcla de física gravitatoria y física nuclear», señala Or Hen, físico del Instituto de Tecnología de Massachusetts. «Ahora mismo las estamos usando como un laboratorio para entender la física nuclear. Pero, dado que aquí en la Tierra podemos acceder a los núcleos atómicos, con el tiempo deberíamos ser capaces de acotar el aspecto nuclear del problema. Entonces podremos usar las estrellas de neutrones para comprender la gravedad, que es uno de los mayores desafíos de la física.»

Descifrar el misterio de las estrellas de neutrones revelaría cómo se comporta la materia bajo condiciones apenas comprensibles

La gravedad, tal y como la entendemos hoy en día —según la relatividad general de Einstein— no casa bien con la mecánica cuántica. Al final, una de las dos teorías habrá de ceder, aunque los físicos aún no saben cuál. «Acabaremos descubriéndolo, y esa es una perspectiva muy emocionante», concluye Hen.

PARA SABER MÁS

Rapid cooling of the neutron star in Cassiopeia A triggered by neutron superfluidity in dense matter. Dany Page et al. en *Physical Review Letters*, vol. 106, art. 081101, febrero de 2011.
GW170817: Measurements of neutron star radii and equation of state. Colaboraciones LIGO y Virgo en *Physical Review Letters*, vol. 121, art. 161101, octubre de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Magnetoestrellas. Chryssa Kouveliotou, Robert C. Duncan y Christopher Thompson en *IyC*, abril de 2003.
¿Existen estrellas de quarks? Markus Thoma en *IyC*, octubre de 2007.
Recreando materia estelar en el laboratorio. Laura Tolos en *IyC*, julio de 2013.
Mensajeros celestes. Ann Finkbeiner en *IyC*, julio de 2018.
Un púlsar de 2,3 masas solares. Manuel Linares, Tariq Shahbaz y Jorge Casares en *IyC*, febrero de 2019.



EN SÍNTESIS

Cuando la corriente en chorro adopta una forma muy sinuosa, puede causar fuertes lluvias o calor intenso durante el verano. Si la corriente se estanca, el mal tiempo puede prolongarse durante días.

Una resonancia en la atmósfera puede amplificar las ondulaciones e incrementar aún más la dureza de estos fenómenos meteorológicos. Las matemáticas de la mecánica cuántica permiten entender este efecto.

Los aerosoles atmosféricos procedentes de las centrales de carbón frenarán el aumento de estos episodios extremos hasta 2050, pero a medida que las centrales instalen lavadores de gases se producirá un recrudecimiento.

CLIMA

EL AMPLIFICADOR METEOROLÓGICO

Las extrañas ondulaciones de la corriente en chorro auguran un futuro lleno de olas de calor e inundaciones

Michael E. Mann

UN INCENDIO AVIVADO por el calor y la sequía se propaga rápidamente cerca de Delta, California, en septiembre de 2018.

CONSIDEREMOS LOS SIGUIENTES VERANOS EXTREMOS. En 2003, la peor ola de calor de la historia de Europa acabó con la vida de más de 30.000 personas. En 2010, los incendios forestales en Rusia y las inundaciones en Pakistán causaron daños y cifras de víctimas mortales sin precedentes. En 2011, una ola de calor en Estados Unidos hizo que los ganaderos de Oklahoma perdieran una cuarta parte de sus reses. En 2016, los incendios de Alberta supusieron el desastre más costoso de la historia de Canadá. Y en 2018 EE.UU. padeció un verano tristemente célebre: las temperaturas se dispararon por encima de los 38 grados Celsius durante días en el desértico suroeste, las fuertes lluvias y las inundaciones anegaron los estados del Atlántico Medio y California vivió una terrible temporada de incendios. Europa y Asia también sufrieron tremendas olas de calor, inundaciones e incendios.

Michael E. Mann es profesor de ciencias de la atmósfera y director del Centro de Ciencias del Sistema Terrestre en la Universidad Estatal de Pensilvania. Participó en el proyecto del Grupo Internacional de Expertos sobre el Cambio Climático que recibió el premio Nobel de la paz en 2007.



¿Es una coincidencia que los veranos más devastadores hayan tenido lugar en las últimas décadas? Mis colaboradores y yo creemos que no. Todos esos eventos meteorológicos se caracterizaron por una configuración atípica de la corriente en chorro, el estrecho cinturón de fuertes vientos que soplan de oeste a este alrededor del hemisferio norte, generalmente a lo largo de la frontera entre EE.UU. y Canadá para luego atravesar el océano Atlántico, Europa y Asia. En ocasiones la corriente es bastante rectilínea, pero también puede presentar pronunciadas ondulaciones, en forma de S tumbada. Normalmente, desde el Pacífico se curva hacia el norte para adentrarse en Canadá occidental, a continuación vira al sur y cruza el Medio Oeste de EE.UU. y vuelve a subir en dirección a Nueva Escocia. Esa forma suele atravesar EE.UU. de oeste a este en pocos días, transportando aire cálido hacia el norte o frío hacia el sur y creando zonas de lluvia o nieve, en especial cerca de las ondulaciones. La corriente en chorro controla el tiempo que hace cada día.

Durante los eventos extremos que he mencionado, la corriente en chorro mostró un comportamiento anómalo: las ondulaciones se adentraron excepcionalmente lejos al norte y al sur y se detuvieron (no progresaron hacia el este). Cuanto mayores son estas curvas, más duro se torna el tiempo cerca de la cresta septentrional y el valle meridional. Y cuando permanecen estancadas, como ocurrió en EE.UU. en el verano de 2018, esas regiones pueden sufrir fuertes lluvias o ser abrasadas por el sol día tras día, con inundaciones, sequías, olas de calor e incendios sin precedentes.

Recientemente, en mi grupo de investigación hemos demostrado que esas configuraciones estancadas y muy curvadas se han vuelto más frecuentes debido al calentamiento global, lo cual potencia los fenómenos meteorológicos extremos. Sin embargo, predecimos que ese incremento podría detenerse durante las próximas décadas, algo que puede sonar extrañamente «bien»: los episodios adversos seguirán ocurriendo, pero al menos no empeorarán. También pronosticamos que los fenómenos extremos comenzarán a ser mucho más duros a partir de 2050 aproximadamente, sobre todo en verano. Aumentarán las amenazas para la salud y la seguridad de la población, las tormentas provocarán más daños y se perderán las cosechas necesarias para alimentar a una población cada vez mayor.

¿Cómo lo sabemos? Gracias a las matemáticas de la mecánica cuántica. Sí, el lenguaje que describe el comportamiento de los electrones a la escala más pequeña nos ayuda a explicar el comportamiento de nuestra atmósfera a escala planetaria, e indica que el aumento de los fenómenos meteorológicos peligrosos, la esperada estabilización y el subsiguiente recrudecimiento responden a un curioso equilibrio entre las concentraciones de los gases de efecto invernadero derivados de la quema de combustibles fósiles y la contaminación por azufre procedente de las chimeneas industriales. Y eso plantea la cuestión de si reducir las emisiones evitará que la corriente en chorro cause estragos.

LAS ONDAS DE ROSSBY TRAEN MAL TIEMPO

La corriente en chorro se forma cuando el aire superficial cálido de las regiones subtropicales del planeta se encuentra (al desplazarse hacia el norte) con el aire superficial frío de la región polar, más o menos en la frontera entre EE.UU. y Canadá. La corriente sopla a unos 10 kilómetros de altitud, en el límite entre la troposfera (la capa más baja de la atmósfera, donde se producen los fenómenos meteorológicos) y la estratosfera (la siguiente capa, en la que vuelan los aviones). Cuanto mayor es la diferencia de temperaturas entre el aire subtropical y el polar, más fuertes son los vientos de la corriente en chorro. En verano la diferencia térmica es menor que en invierno y la corriente se debilita, lo que la hace más propensa a mostrar pronunciadas ondulaciones al norte y al sur.

Pero ¿por qué aparecen las curvas donde lo hacen? La corriente en chorro está condicionada por un conjunto de grandes ondas que viajan en la atmósfera, generadas en los fluidos (en este caso el aire, aunque también ocurren en los océanos) debido a la rotación de la Tierra. Se trata de las ondas de Rossby, bautizadas con el nombre de Carl-Gustaf Rossby, quien en la década de los treinta explicó la física de los movimientos atmosféricos a gran escala. Las ondas de Rossby atmosféricas se extienden a lo largo de cientos de kilómetros y se propagan de oeste a este en el hemisferio norte. En verano, cuando disminuye la diferencia de temperatura entre las masas de aire, las ondas de Rossby tienden a curvarse más y a avanzar más despacio sobre Norteamérica. La corriente en chorro adopta la forma y trayectoria de esas ondas.

Pero hay más ondas que surcan la atmósfera y los océanos. Por ejemplo, las ondas de gravedad, formadas cuando se perturba el equilibrio entre la gravedad que atrae a la atmósfera hacia la superficie y las fuerzas de flotación que la empujan hacia arriba, como cuando una corriente de aire cruza una cordillera. O las

PÁGINAS ANTERIORES: JOSH EDELSON, GETTY IMAGES

ondas de Kelvin, que se originan en el Pacífico, en un estrecho pasillo a lo largo del ecuador, y se propagan de oeste a este de manera predecible. Al hacerlo calientan y enfrían periódicamente las aguas superficiales, un ingrediente esencial del fenómeno climático de El Niño.

Los meandros de la corriente en chorro generan sistemas meteorológicos superficiales locales que se desplazan hacia el este junto con las ondulaciones: son los sistemas de altas y bajas presiones que vemos representados en los mapas del tiempo con una A o una B. Los sistemas de altas presiones situados dentro de la curva septentrional, o cresta, rotan en sentido horario, y en verano producen un tiempo seco y cálido. Por su parte, los sistemas de bajas presiones anidados en la ondulación meridional, o valle, rotan en sentido antihorario y traen consigo un tiempo húmedo y frío. Si la corriente en chorro es lo bastante débil, la onda de Rossby en forma de S a la que sigue puede quedarse estancada, sin avanzar hacia el este, en una configuración de «onda estacionaria». Los sistemas de altas y bajas presiones rotan sin moverse del sitio, abrasando de manera persistente la superficie o azotándola con incesantes tormentas e inundaciones, como ocurrió con los huracanes Harvey en Texas y Florence en el este de EE.UU.



LAS INTENSAS INUNDACIONES causadas por un efecto atmosférico conocido como amplificación cuasirresonante dejaron sumergida la ciudad pakistaní de Khairpur Nathan Shah en 2010.

GIDEON MENDEL, GETTY IMAGES

LA RESONANCIA EMPEORA LAS COSAS

Los fenómenos meteorológicos verdaderamente extremos tienden a producirse cuando las curvas de las ondas de Rossby y, por lo tanto, de la corriente en chorro se amplifican de forma notable. Cuanto más septentrionales son sus crestas y más meridionales sus valles, más profundos son los sistemas de altas y bajas presiones. En ese régimen de onda estacionaria, el sistema de altas presiones se estanca (lo que se conoce como un «patrón de bloqueo»). Eso fue lo que causó la ola de calor de julio de 2018 en el suroeste de EE.UU. y las inundaciones que sacudieron al mismo tiempo el Atlántico medio. Encontramos otro ejemplo en julio de 2010, cuando una cresta situada sobre Rusia provocó un calor, una sequedad y unos incendios sin precedentes, mientras, corriente abajo, un acusado valle sobre Pakistán producía unas inundaciones históricas.

La amplitud que pueden alcanzar las ondas de Rossby está limitada por la energía que pierden a medida que serpentean hacia el norte y el sur y se propagan hacia el este. Sin embargo, en determinadas condiciones, la atmósfera puede actuar como una especie de guía de ondas. Imaginemos una línea que atraviese de oeste a este el centro de Canadá y otra que cruce el sur de EE.UU. Una onda de Rossby curvada puede detenerse entre esas «paredes» sin apenas perder energía. La sinuosa corriente en chorro y los sistemas de altas y bajas presiones también quedan bloqueados. (El cable coaxial que llega a nuestro televisor desde la antena es un ejemplo de una guía de ondas. Las ondas electromagnéticas que transmiten la señal de televisión están confinadas dentro de la pared cilíndrica del cable y la señal no pierde casi energía. Gracias a ello podemos disfrutar de imágenes nítidas.)

Cuando las ondas se quedan estancadas en forma de ondas estacionarias, hay determinadas circunstancias en que la amplitud de los meandros puede aumentar fácilmente. Eso es lo que en física se conoce como «resonancia», y cuando sucede con las ondas de Rossby —por lo general, en verano— recibe el nombre de amplificación cuasirresonante (QRA, por sus siglas en inglés). Hace unos años, Vladimir Petoukhov y sus colaboradores del Instituto de Investigaciones sobre Impacto Climático de Potsdam, en Alemania, demostraron que las condiciones que permiten la QRA dependen de la forma de la corriente en chorro. El cambio climático puede influir en esa forma y, por consiguiente, en la QRA y en la frecuencia con que se producen fenómenos meteorológicos extremos durante el verano.

Para comprender cómo ocurre esta confluencia, debemos recurrir a las matemáticas que se desarrollaron a comienzos del siglo xx para resolver ciertos problemas en mecánica cuántica. Esa conexión me produce una especial satisfacción, ya que mi carrera comenzó en el campo de la física teórica, y es reconfortante ver que los libros de mecánica cuántica que he conservado durante décadas aún me resultan útiles.

LA CONEXIÓN CUÁNTICA

Comprender las semejanzas matemáticas entre el comportamiento de una onda atmosférica y el de un electrón nos revelará una de las razones principales por las que se están intensificando las sequías e inundaciones.

Según la física clásica, un electrón queda atrapado si la energía potencial alrededor suyo es muy elevada. Imaginemos que pudiéramos mirar desde un lateral a través de una caja de paredes infinitamente altas. El electrón no puede atravesar las paredes, ya que es imposible superar la energía infinitamente elevada que implican, por lo que rebota de un lado a otro siguiendo una trayectoria recta.

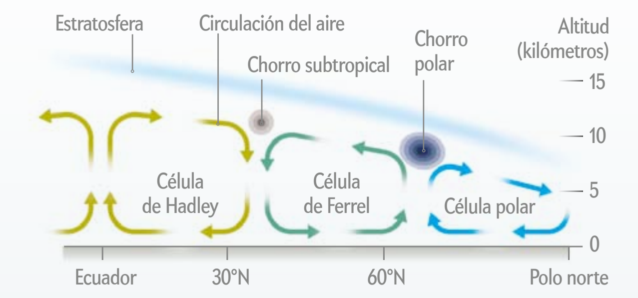
En el marco de la mecánica cuántica, las cosas cambian. El electrón ya no ocupa una posición definida, sino que existe una cierta probabilidad de encontrarlo en distintos puntos, determinada por la famosa ecuación de Schrödinger (una ecuación de onda). El movimiento del electrón —o, para ser más precisos, la probabilidad de la que hablábamos— está descrito por una curva sinusoidal: una S tumbada. ¿Le resulta familiar? El electrón se comporta en parte como una partícula y en parte como una onda.

Cuando la altura de las «paredes» de energía potencial no es infinita, ocurre algo interesante: el electrón tiene una pequeña

Continua en la página 30

Fenómenos meteorológicos extremos bloqueados

La corriente en chorro determina las condiciones meteorológicas en el hemisferio norte. Cuando se curva, puede generar importantes centros de presión que producen calor intenso o fuertes lluvias (*globos terráqueos*). Las ondulaciones de gran tamaño pueden quedarse estancadas en un lugar y hacer que las condiciones extremas se prolonguen durante días, especialmente en verano. Curiosamente, las matemáticas del problema se asemejan a la de ciertos problemas en mecánica cuántica (*recuadro*).



La corriente en chorro rodea la Tierra

Las corrientes en chorro surgen a unos 30 y 60 grados de latitud, entre las principales células de circulación atmosférica (*arriba*). El chorro polar del hemisferio norte sopla de oeste a este alrededor del planeta, unas veces casi en línea recta y otras con leves ondulaciones (*abajo*). Los sistemas meteorológicos tienden a seguir su trayectoria.

Rotación de la Tierra

Corriente en chorro polar

Una «guía de ondas» en el cielo

Desde un punto de vista matemático, la guía de ondas atmosférica que confina las ondas de Rossby es similar a la guía de ondas cuántica que confina un electrón. Según la física clásica, un electrón atrapado en una caja con paredes infinitamente altas (que representan barreras de energía elevada) se comporta como una partícula y rebota de un lado a otro **A**. Si las paredes poseen una energía moderada, el electrón puede escapar. Pero según la física cuántica, un electrón actúa como una onda atrapada en una guía de ondas; si la guía es «débil» (energía moderada), existe una probabilidad apreciable de encontrar el electrón fuera de sus paredes **B**. Pero si la guía de ondas posee una energía elevada, la probabilidad de que el electrón «abra un túnel» a través de las paredes es mucho menor. Esto es parecido a lo que ocurre cuando las ondas de Rossby asociadas a una corriente en chorro muy sinuosa quedan atrapadas en una guía de ondas atmosférica y azotan la superficie terrestre con olas de calor o lluvias persistentes.

Generación de centros de presión

En verano, las ondulaciones pronunciadas de la corriente en chorro crean sistemas de bajas presiones (B), que traen consigo un tiempo frío y húmedo, y de altas presiones (A), que producen condiciones cálidas y secas. A veces la corriente en chorro adopta un patrón sinuoso (*imagen*) que reproduce la forma de las ondas de Rossby generadas en la atmósfera por la rotación de la Tierra. Ese patrón —y con él, los fenómenos meteorológicos— se desplaza de oeste a este.

Sistema de bajas presiones (B)

Patrón de ondas de Rossby

Sistema de altas presiones (A)

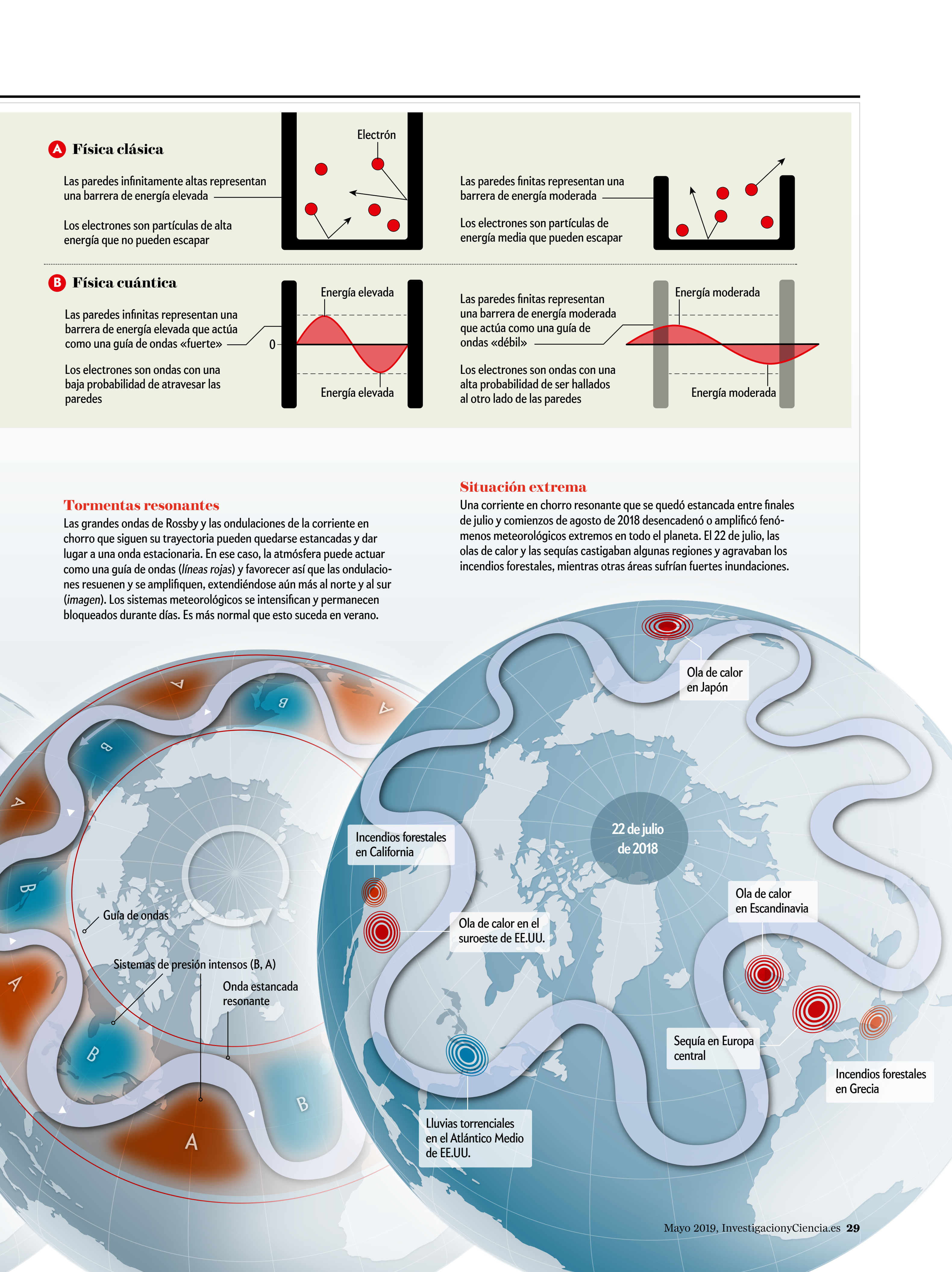
B

B

A

A

5W INFOGRAPHICS (*globos terráqueos*) Y JEN CHRISTIANSEN (*guías de ondas*)



Tormentas resonantes

Las grandes ondas de Rossby y las ondulaciones de la corriente en chorro que siguen su trayectoria pueden quedarse estancadas y dar lugar a una onda estacionaria. En ese caso, la atmósfera puede actuar como una guía de ondas (*líneas rojas*) y favorecer así que las ondulaciones resuenen y se amplifiquen, extendiéndose aún más al norte y al sur (*imagen*). Los sistemas meteorológicos se intensifican y permanecen bloqueados durante días. Es más normal que esto suceda en verano.

Situación extrema

Una corriente en chorro resonante que se quedó estancada entre finales de julio y comienzos de agosto de 2018 desencadenó o amplificó fenómenos meteorológicos extremos en todo el planeta. El 22 de julio, las olas de calor y las sequías castigaban algunas regiones y agravaban los incendios forestales, mientras otras áreas sufrían fuertes inundaciones.





GIRASOLES agostados (*1*) y semillas atrofiadas (*2*) cerca de Golssen, Alemania, a causa de la prolongada ola de calor de 2018.

Viene de la página 27

probabilidad de penetrar en la pared y puede llegar a atravesarla si es suficientemente delgada: es como si lanzásemos una pelota de tenis contra un muro de cemento y «abriese un túnel» hasta salir por el otro lado. El electrón está en gran medida confinado en la caja, pero posee una mínima probabilidad de «filtrarse» a través de sus paredes.

Mirar a través de esta caja finita es como asomarse al interior de una guía de ondas tridimensional con pequeñas pérdidas, como un cable coaxial. La perla matemática que nos permite resolver las ecuaciones que describen esos objetos se conoce como aproximación WKB, en honor a los tres científicos que la propusieron en 1926: Gregor Wentzel, Hendrik Kramers y Léon Brillouin. La aproximación WKB se usa en muchas ecuaciones de onda de la mecánica cuántica y facilita el diseño de dispositivos como el diodo túnel de nuestros teléfonos móviles.

A comienzos de la década de los ochenta, David Karoly, actualmente en la Organización de Investigaciones Científicas e Industriales de la Commonwealth, en Australia, y Brian Hoskins, de la Universidad de Reading, en Inglaterra, demostraron que la atmósfera puede comportarse como una guía de ondas para ondas de Rossby estancadas (estacionarias) con ciertas longitudes de onda cortas (del orden de la anchura de la parte continental de EE.UU., es decir, tales que haya entre seis y ocho longitudes de onda completas alrededor del hemisferio Norte).

La onda de Rossby estacionaria queda atrapada en la guía de ondas y solo presenta mínimas pérdidas de energía a través de los límites norte y sur, igual que el electrón. En esa situación, la amplitud de las ondas puede aumentar debido a la QRA. Estancada, la ahora enorme onda estacionaria crea en el interior de las crestas y los valles sistemas meteorológicos extremos que persisten durante días. La aproximación WKB, que permite solucionar problemas relacionados con guías de ondas en mecánica cuántica, también ayuda a resolver el problema asociado a la guía de ondas de Rossby.

EL PAPEL DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Llegados a este punto, podemos analizar cómo afecta el cambio climático a las ondas estacionarias que producen episodios persistentes de tiempo extremo. Hace unos años, Petoukhov y sus colaboradores de Potsdam ampliaron la propuesta de Karoly y Hoskins y demostraron que las condiciones para la amplificación de las ondas de Rossby estacionarias se dan principalmente en verano. En la estación estival, la corriente en chorro a menudo no consiste en un único cinturón de vientos fuertes que soplan de oeste a este, sino que alterna entre dos pasillos situados al norte y al sur de su posición habitual a lo largo de la frontera entre EE.UU. y Canadá.

Usando la aproximación WKB, el grupo de Petoukhov descubrió que es precisamente en esas condiciones de «doble chorro» cuando la atmósfera puede comportarse como una guía de ondas para ondas de Rossby con longitudes de onda cortas. La amplitud de esas ondas suele ser pequeña: las curvas no se extienden demasiado al norte y al sur. Pero si se genera una curvatura inicial cuando una masa de aire que viaja de oeste a este alcanza las Montañas Rocosas o los Alpes, o cuando se encuentra con un fuerte contraste de temperaturas superficiales en el límite entre la tierra y el océano, las ondas de Rossby pueden desarrollar ondulaciones mucho más amplias gracias a la QRA.

No todos los años se dan las condiciones que permiten la QRA: en gran parte, depende del patrón de variaciones de temperatura norte-sur en la parte baja de la atmósfera, que puede calcularse a partir de los modelos climáticos. En 2017, demostramos que en las últimas décadas ha habido una mayor tendencia a que se produzcan condiciones favorables para la QRA. Las simulaciones demuestran que eso responde a un aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero. También influyen factores naturales, como las fluctuaciones de la radiación solar y las erupciones volcánicas, y otros factores de origen humano, en particular la contaminación atmosférica por dióxido de azufre. Esas simulaciones, llamadas CMIP5, son el resultado del trabajo de modelización que más de 50 equipos de todo el mundo realizaron para el último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).

Las temperaturas registradas en estaciones meteorológicas y los modelos demuestran que, debido al cambio climático, el Ártico se calienta más rápido que el resto del hemisferio norte, una circunstancia conocida como amplificación ártica [*véase* «Colapso ártico», por Jennifer A. Francis; Investigación y Ciencia, junio de 2018]. Una menor diferencia térmica entre latitudes medias y polares ralentiza la corriente en chorro, lo que favorece los regímenes meteorológicos persistentes y se relaciona con el doble chorro y la QRA.

Esa tendencia creciente ayuda a explicar la oleada de eventos meteorológicos extremos y persistentes observados en verano en el hemisferio norte durante las últimas dos décadas. Recientemente, los científicos han demostrado que la ola de calor de 2003 en Europa, los incendios de 2010 en Rusia y las correspondientes

SEAN GALLUP, GETTY IMAGES

inundaciones en Pakistán, la sequía que azotó Oklahoma y otras partes de EE.UU. en 2011 y los incendios de California en 2015 y Alberta en 2016 están relacionados con condiciones favorables para la QRA. Ahora podemos añadir a la lista los históricos incendios de 2018 en California. El cambio climático inducido por el ser humano ha hecho que la probabilidad de estos eventos meteorológicos desmesurados haya aumentado alrededor de un 50 por ciento en las últimas décadas.

EL ESTANCAMIENTO

A primera vista parece que los eventos meteorológicos extremos deberían seguir intensificándose, y algunos factores básicos así lo sugieren. Por ejemplo, una atmósfera más cálida retiene más humedad, lo que conlleva más lluvias torrenciales e inundaciones. Y un planeta más cálido presenta olas de calor más frecuentes, prolongadas e intensas. Pero ¿qué ocurre con la corriente en chorro asociada a ondas estacionarias y la QRA?

Tal y como parece que observaron el gran físico Niels Bohr y, más adelante, la leyenda del béisbol Yogi Berra, hacer predicciones es muy difícil, «especialmente sobre el futuro». En un artículo que publiqué con mi equipo en octubre de 2018 en *Science Advances*, analizamos la probable evolución de los eventos relacionados con la QRA como resultado del cambio climático previsto. Esperábamos que la tendencia continuara creciendo sin cesar, pero eso no fue lo que encontramos.

El IPCC y los experimentos CMIP5 evalúan las condiciones futuras bajo diferentes supuestos, desde una reducción radical e inmediata de las emisiones de dióxido de carbono hasta un mundo que mantenga la senda actual y siga emitiendo cada vez más CO_2. Bajo esta última hipótesis, hallamos que la tendencia hacia las condiciones que favorecen la QRA se estabiliza hasta 2050, más o menos, para después acelerarse en la segunda mitad de siglo.

La razón tiene que ver con otra importante —aunque a veces ignorada— contribución humana al cambio climático: los contaminantes atmosféricos como el dióxido de azufre, generados por la combustión de carbón y otros procesos industriales. Esos contaminantes forman aerosoles, partículas suspendidas en la atmósfera que reflejan la luz solar hacia el espacio y enfrían nuestro planeta.

La contaminación por aerosoles produjo lluvia ácida en el noreste de EE.UU. entre los años cincuenta y setenta. La Ley del Aire Limpio obligó a las plantas industriales a instalar «lavadores de gases» en sus chimeneas para eliminar el dióxido de azufre de las emisiones. La medida ayudó a salvar bosques, lagos y corrientes de agua, pero también redujo los niveles atmosféricos de aerosoles capaces de reflejar la luz solar y contrarrestar el aumento de CO_2. Esa es una de las razones por las que el calentamiento global se ha acelerado desde la década de los setenta.

Buena parte del resto del mundo —sobre todo China, responsable de casi la mitad de la combustión mundial de carbón— sigue empleando prácticas industriales desfasadas. El escenario de evolución sin cambios del IPCC supone que países como China continuarán quemando carbón y contribuyendo a aumentar las emisiones de CO_2, que ascenderían a más del triple de los valores preindustriales a finales del siglo XXI. Pero también da por sentado que esas industrias instalarán lavadores de gases en las próximas décadas.

Eso producirá una drástica reducción de los aerosoles (y un calentamiento mucho mayor) para mediados de siglo. El efecto será especialmente importante en las latitudes medias y durante el verano, cuando la insolación es máxima, puesto que gran parte de la luz ya no se reflejará. En algunas simulaciones, el calentamiento estival en esas latitudes llega a superar el del Ártico, con lo que la amplificación ártica se reduce o incluso desaparece. En consecuencia, la QRA dejaría de aumentar o incluso disminuiría y no seguirían acentuándose los patrones de la corriente en chorro que explican el incremento de eventos meteorológicos estivales de carácter extremo.

EL DESTINO ESTÁ EN NUESTRAS MANOS

Aunque esa perspectiva parece buena, en realidad es un pacto con el diablo: a la larga, la atenuación a corto plazo tiene un elevado coste. A mediados de siglo, los aerosoles casi habrán desaparecido, así que a partir de ese momento el aumento de los gases de efecto invernadero continuará elevando las temperaturas. El incremento volverá a ser mayor en la región polar, se reanudará la amplificación ártica y volverán a aumentar (hasta un 50 por ciento antes de que acabe el siglo) los eventos meteorológicos estancados e intensos —cálidos, secos y húmedos— relacionados con la QRA. El cambio será más acusado en verano y en las latitudes medias, algo especialmente preocupante porque es donde se concentran la mayoría de la población y gran cantidad de cultivos, muchos de los cuales crecen en verano y no resisten temperaturas muy elevadas.

¿Hay algo que podamos hacer? Si el mundo actúa ya para rebajar de manera significativa las emisiones de carbono, podemos evitar un calentamiento global catastrófico de dos grados Celsius y, muy probablemente, que vuelvan a aumentar los eventos relacionados con la QRA. La vía más segura, y más rentable, consiste en reducir inmediatamente la quema de combustibles fósiles y otras actividades humanas que eleven las concentraciones de gases de efecto invernadero.

Cabe señalar que el mundo debe tomar decisiones en condiciones de incertidumbre: mientras algunas simulaciones indican grandes aumentos (de más del triple) en los eventos relacionados con la QRA, otras muestran disminuciones. En gran medida, esta dispersión responde a las distintas maneras en que los modelos climáticos tratan los aerosoles. ¿Convergerán las predicciones? Aún no lo sabemos, pero dada la incertidumbre y el enorme riesgo potencial si se cumple el peor de los escenarios, reducir notablemente las emisiones parece lo más inteligente.

No hay duda de que minimizar las incertidumbres resultaría útil. Lograrlo pasa (al menos en parte) por perfeccionar nuestra descripción física de los aerosoles y su capacidad para reflejar la luz solar, es decir, las ondas electromagnéticas emitidas por el Sol. Y eso exige comprender el comportamiento de las ondas, lo que nos lleva de nuevo al punto de partida. IyC

PARA SABER MÁS

Influence of anthropogenic climate change on planetary wave resonance and extreme weather events. Michael E. Mann et al. en *Scientific Reports*, vol. 7, art. 45242, marzo de 2017.

The influence of Arctic amplification on mid-latitude summer circulation. D. Coumou et al. en *Nature Communications*, vol. 9, art. 2959, agosto de 2018.

Projected changes in persistent extreme summer weather events: The role of quasi-resonant amplification. Michael E. Mann et al. en *Science Advances*, vol. 4, n.º 10, art. eaat3272, octubre de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

El comportamiento anómalo de la corriente en chorro. Jeff Masters en *IyC*, febrero de 2015.



DESENREDAR EL GENOMA

Los nuevos descubrimientos sobre los lazos ancestrales del ADN nos revelan las claves de la regulación génica

Erez Lieberman Aiden

EN SÍNTESIS

El autor y sus colaboradores han demostrado que el ADN del genoma humano forma unos 10.000 lazos en cada célula. Las células de los ratones y otros organismos presentan muchos de los mismos lazos.

Recientemente, el equipo ha descubierto cómo se forman los lazos. Los produce un mecanismo biológico que funciona de un modo muy parecido al de las hebillas deslizantes que se utilizan para ajustar la longitud de los tirantes de las mochilas.

Estos lazos parecen intervenir en la regulación de la actividad de los genes, aunque los nuevos hallazgos hacen pensar que podrían tener otro propósito todavía por descubrir.

ILUSTRACIÓN DE TRACI DABERKO

Erez Lieberman Aiden es director del Centro para la Arquitectura del Genoma, de la Escuela de Medicina de Baylor y la Universidad Rice.



COMO ME CUESTA MUCHO HACERME UNA IDEA DE ALGO TAN PEQUEÑO COMO la estructura del genoma humano, prefiero imaginarlo un millón de veces más grande. Con este aumento, cada molécula de ADN (un cromosoma) tendrá el grosor de un tallarín. Así ampliados y colocados uno detrás de otro, los 46 cromosomas que componen el genoma de una célula abarcarían la distancia que separa Barcelona de Copenhague, aunque plegados cabrían en una estructura del tamaño de una casa (el núcleo de la célula). En conjunto, los 46 cromosomas contienen dos juegos de unos 20.000 genes en los que está codificado, letra a letra, un mensaje que le indica a la célula cómo fabricar una proteína concreta; a esta megaescala, un gen tendría la longitud de un coche.

Si mirásemos detenidamente en el interior del núcleo, veríamos el ADN en una continua agitación. Cuando era un doctorando, hace una década, me preguntaba mientras removía los tallarines de la cena cómo lograba el genoma, a diferencia de los tallarines, no enredarse en una maraña que le impidiera enviar esos mensajes genéticos tan decisivos.

En 2014, nuestro equipo de la Escuela de Medicina de Baylor, en Texas, contribuyó a dar respuesta a esa pregunta y añadió una pieza más a lo que cada vez estaba más aceptado: que la estructura del genoma dentro del núcleo distaba mucho de ser aleatoria. Junto con mis colaboradores Suhas Rao, Miriam Huntley y Adrian Sanborn descubrimos que, al plegarse, el genoma humano forma unos 10.000 lazos que obedecen a un código sencillo oculto en la propia secuencia del genoma. Se trata de estructuras ancestrales, porque muchos de ellos aparecen también en los ratones, como si fuera un legado que heredamos de un antepasado que vivió hace más de 60 millones de años. Esta larga persistencia hace pensar que resultan decisivos para la supervivencia.

Los lazos parecen ayudar a controlar la actividad de los genes. Todas las células tienen los mismos genes, pero si los perfiles de actividad no fueran distintos el cuerpo no podría existir, porque una célula cardíaca no sería diferente de una nerviosa. Desentrañar cómo se orquestan estos perfiles distintivos ha supuesto un auténtico rompecabezas. Hoy parece claro que los lazos sirven para controlar los perfiles de expresión, cual director de orquesta que dicta el momento y la cantidad en que se han de activar ciertos genes para modificar el funcionamiento de la célula.

A medida que sigamos explorando los lazos, esperamos conocer mejor la regulación génica y hallar las claves sobre el origen de numerosas enfermedades. Recientemente, entre varios investigadores hemos resuelto su formación: bailan un tango con elegancia para mantener el genoma a salvo de los enredos.

UN FACEBOOK PARA EL GENOMA

Mis cavilaciones sobre los enredos del ADN guardan relación con una cuestión más amplia: ¿cómo influye la organización tridimensional del ADN del núcleo sobre la actividad de los genes? Las pruebas acumuladas desde finales de los años 70 del siglo XX indican que, para activar los genes, se necesitan unos pequeños segmentos de ADN denominados potenciadores o intensificadores. Los biólogos también habían aprendido que, en una cadena de ADN, los potenciadores podían situarse muy lejos de los genes destinatarios. Para «encender» el interruptor de un gen (un tramo de ADN adyacente al gen, denominado promotor), la cadena tendría que plegarse sobre sí misma para acercar el potenciador al promotor. ¿Era correcta tal suposición? Me quedé cautivado por ese problema y pensé que solo había una manera de resolverlo: hallar todos los lazos.

Conceptualmente, el plan para hacerlo era sencillo: si dos personas andan juntas con frecuencia, es lógico suponer que son amigos. De igual forma, si dos tramos de ADN («locus») apartados uno del otro en el cromosoma tienden a aparecer juntos con especial frecuencia, resulta razonable pensar que quizás el ADN se ha plegado en un lazo. Lo que necesitábamos era un método para medir la frecuencia con la que los tramos del genoma interaccionan entre sí, o sea, construir algo así como un Facebook, pero para el genoma humano.

Para hacer realidad nuestra idea, adaptamos un método descrito en 1993 por Katherine Cullen, por entonces en la Universidad de Vanderbilt, y sus colaboradores. Por aquel tiempo, el genoma se resistía a ser estudiado mediante cualquier forma conocida de captura de imágenes, porque sus cromosomas eran como tallarines inquietos en un plato que no dejaban de moverse. Pero Cullen hizo que la hiperactividad cromosómica trabajase a su favor. Sabía que el continuo ajetreo de los cromosomas

haría que diferentes tramos del genoma chocasen entre sí. Los que estuvieran muy próximos uno del otro se toparían muchas veces, mientras que los alejados lo harían solo de vez en cuando. Por tanto, si pudiéramos medir la frecuencia de los choques, podríamos imaginar qué partes del genoma se situarían cerca de otras en el espacio tridimensional.

Para medir esa frecuencia, Cullen y sus colaboradores desarrollaron una técnica que denominaron análisis de ligación nuclear. En esencia, consiste en tomar las células y, sin destruirles el núcleo, se les estabiliza el genoma. A continuación, se manda una enzima para que corte el ADN en diminutos fragmentos y luego se introduce una proteína que fusiona los extremos de dos fragmentos cercanos para que formen una única cadena. Finalmente, en el conjunto de los fragmentos fusionados se examina la secuencia de pares de bases de ADN (las parejas de letras del código del ADN que forman los «peldaños» de su conocida estructura en «escalera»). Si, célula tras célula, se observan fusiones de dos tramos de pares de bases que originalmente no se hallaban cerca en el cromosoma (conocidas como uniones por ligación), podemos concluir que estos fragmentos se acercan con frecuencia uno al otro en el espacio tridimensional del núcleo.

La genialidad de Cullen, publicada en la revista *Science*, le permitió demostrar que dos tramos que rematan un fragmento largo y específico de ADN chocan entre sí con mucha más frecuencia de lo que cabría esperar si los choques solo fueran por casualidad. En otras palabras, este ADN formaba un lazo.

En 1993, era muy difícil realizar experimentos con el análisis de ligación nuclear. Menos mal que, a mediados del 2000, la época en la que vi el artículo de Cullen como estudiante universitario, ya estaba disponible un genoma humano de referencia y la secuenciación del ADN se había abaratado mucho. En colaboración con tres colegas del Instituto Broad del MIT y de la Universidad Harvard (Chad Nusbaum, Andreas Gnirke y Eric Lander), esbozamos un método que analizaría la frecuencia de contacto no solo de un único par de posiciones del ADN, sino de todos ellos en todo el genoma al mismo tiempo. También nos permitiría localizar con exactitud de dónde venía cada una de las mitades de las uniones por ligación.

Decidimos basar nuestro nuevo método en una variante del procedimiento de Cullen que había sido desarrollado por Job Dekker, en la Facultad de Medicina de la Universidad de Massachusetts. En vez de utilizar, como Cullen, los núcleos celulares intactos, Dekker separó el núcleo y realizó las etapas cruciales de la ligación en una solución muy diluida. Esta modificación, que Dekker había popularizado con el apodo «captura de la conformación del cromosoma», o «3C», se creía que ofrecía una estimación más fiable de la frecuencia de los choques.

Nosotros añadimos unas pocas etapas a la 3C. Antes de pegar los fragmentos, les pondríamos marcas fáciles de detectar en los extremos del ADN hecho añicos para señalar el punto por el que se unirían dos fragmentos cercanos. Después, cortaríamos en piezas más pequeñas los fragmentos pegados y recuperaríamos solo los tramos que llevaran las marcas; estos contendrían las uniones por ligación puras. En colaboración con Dekker, con su estudiante posdoctoral Nynke van Berkum, y con Louise Williams, del Instituto Broad, descubrimos que podíamos identificar de una vez millones de contactos. Lo denominé el método «Hi-C», por combinación de «3C» y del nombre de una de mis bebidas favoritas de niño. Publicamos el método en 2009.

Nuestros primeros mapas por Hi-C de genomas completos mostraban que los cromosomas no se replegaban en un revoltijo aleatorio dentro del núcleo, sino que cada uno se repartía en dominios: tramos de ADN que contenían segmentos que entraban en contacto entre sí con frecuencia. En cambio, escaseaban las interacciones entre los locus de distintos dominios. Es más, nuestros datos de Hi-C revelaron que cada uno de los dominios se asentaba dentro de uno de los dos vecindarios espaciales más grandes del núcleo celular. Denominamos «compartimentos» a estos vecindarios y los etiquetamos como A y B.

Encontramos que en el compartimento A abundaban los indicadores de actividad genética, como los ARN mensajeros (las moléculas que los genes mandan para informar al resto de la célula sobre lo que tiene que hacer). El compartimento B estaba empaquetado con más densidad y era más bien inactivo. Cuando los dominios se encendían o se apagaban, se movían de un compartimento al otro. (Hoy sabemos que los núcleos de las células contienen muchos subcompartimentos A y B.)

Para medir la frecuencia con la que interaccionan distintos tramos del genoma, necesitábamos construir algo como un Facebook, pero para el genoma humano

Nos excitó descubrir esta compartimentación dinámica, porque confirmaba que la estructura tridimensional del genoma no era aleatoria, sino que estaba íntimamente asociada a la actividad de los genes. Pero me disgustaba que nunca apareciese en los datos de Hi-C una peculiaridad del plegamiento: ¡los lazos!

Los datos de Hi-C a menudo se representan como un mapa cromático que muestra la frecuencia con la que entran en contacto dos locus de un cromosoma. En tales gráficos, la frecuencia de los contactos entre dos locus se indica con una mancha brillante en los ejes x e y que representan la intersección de los locus, con lo que un lazo se manifestará como una mancha inusualmente brillante que corresponde a los dos puntos de anclaje de un lazo. Pero en nuestros mapas no veíamos ninguno de estos picos de brillo. Si no lográbamos demostrar que se estaban formando lazos, no podíamos explorar si los potenciadores activaban los genes al acercarse físicamente a los promotores.

A POR EL MAPA DE LAZOS

Este problema nos dejó sin respuestas durante los siguientes tres años, hasta que, en 2102, Rao y Huntley averiguaron dónde estaba el fallo. Se dieron cuenta de que un paso del Hi-C, a saber, la destrucción del núcleo de la célula antes de la ligación, rompía las estructuras delicadas, como los lazos. De modo que se dispusieron a adaptar el método de Hi-C para que mantuviera los núcleos inalterados durante la ligación.

El nuevo método, denominado Hi-C in situ, supuso una gran diferencia. En sus estudios con leucocitos, Rao y Huntley hallaron que los picos de brillo aparecían ahora por todas partes en los mapas cromáticos, y cada uno representaba un posible lazo. Ya habían pasado seis años desde que comencé a estudiar

la ubicación de los lazos y no daba crédito a lo que veían mis ojos. A mi equipo y a mí nos preocupaba que estuviéramos viendo cosas en los datos que realmente no había.

Para asegurarme de que no me estaba enfrentando a un sesgo de confirmación, me llevé los mapas a casa y se los enseñé a mi hijo Gabriel, que por entonces tenía tres años: «¿Ves una mancha roja?», le pregunté. «Sí», contestó, y me la señaló.

Lo habíamos conseguido: un mapa donde se mostraban 10.000 lazos que se extendían por todo el genoma humano. Al comprobar si los lazos ponían en contacto los promotores y los potenciadores de los genes, observamos que lo hacían con frecuencia.

En un análisis adicional, comparamos los mapas que obtuvimos de las células sanguíneas con los de otra clase de células, las pulmonares. Muchos de los lazos coincidían, pero también vimos conexiones nuevas que achacamos a diferentes potenciadores y diferentes genes destinatarios. Estos cambios del patrón de lazos sugerían su posible implicación en la regulación de los genes que confieren a una célula su identidad.

Nos preguntamos si la presencia de lazos era típica de los humanos y si se formarían los mismos en otros organismos. Así que trazamos el mapa de su ubicación en las células de ratón y hallamos que la mitad de ellos aparecían en una posición equivalente a la del genoma humano. Los lazos comunes se habían conservado durante al menos 60 millones de años de evolución.

UNA ESTRUCTURA ENREVESADA

Una deducción interesante de nuestros datos era que los lazos no eran estáticos: parecían formarse, destruirse y volverse a formar sin cesar. Por supuesto, queríamos saber cómo ocurría.

Aunque sospecháramos que debían de intervenir cientos de proteínas, los datos nos contaban una historia diferente. En todos los lazos destacaban dos factores proteicos. El primero, denominado CTCF (descubierto por Victor Lobanenkov y sus colaboradores en 1990), contiene 11 dedos de zinc que le permiten fijarse con mucha fuerza a determinadas posiciones del ADN. El segundo factor, la cohesina, descubierta en 1997 por Kim Nasmyth, en la actualidad en la Universidad de Oxford, es un complejo anular formado por varias proteínas. Se pensaba que los dos anillos de cohesina se acoplarían para funcionar como uno solo: cada anillo rodearía al ADN y se deslizaría por él con total libertad, como una alianza por un collar.

Habernos encontrado con estas proteínas no resultaba tan sorprendente: estudios anteriores habían sugerido su posible intervención en el plegamiento del genoma, aunque resultaba inesperada su ubicua presencia en los anclajes de los lazos, sobre todo en los que conectaban los promotores y los potenciadores.

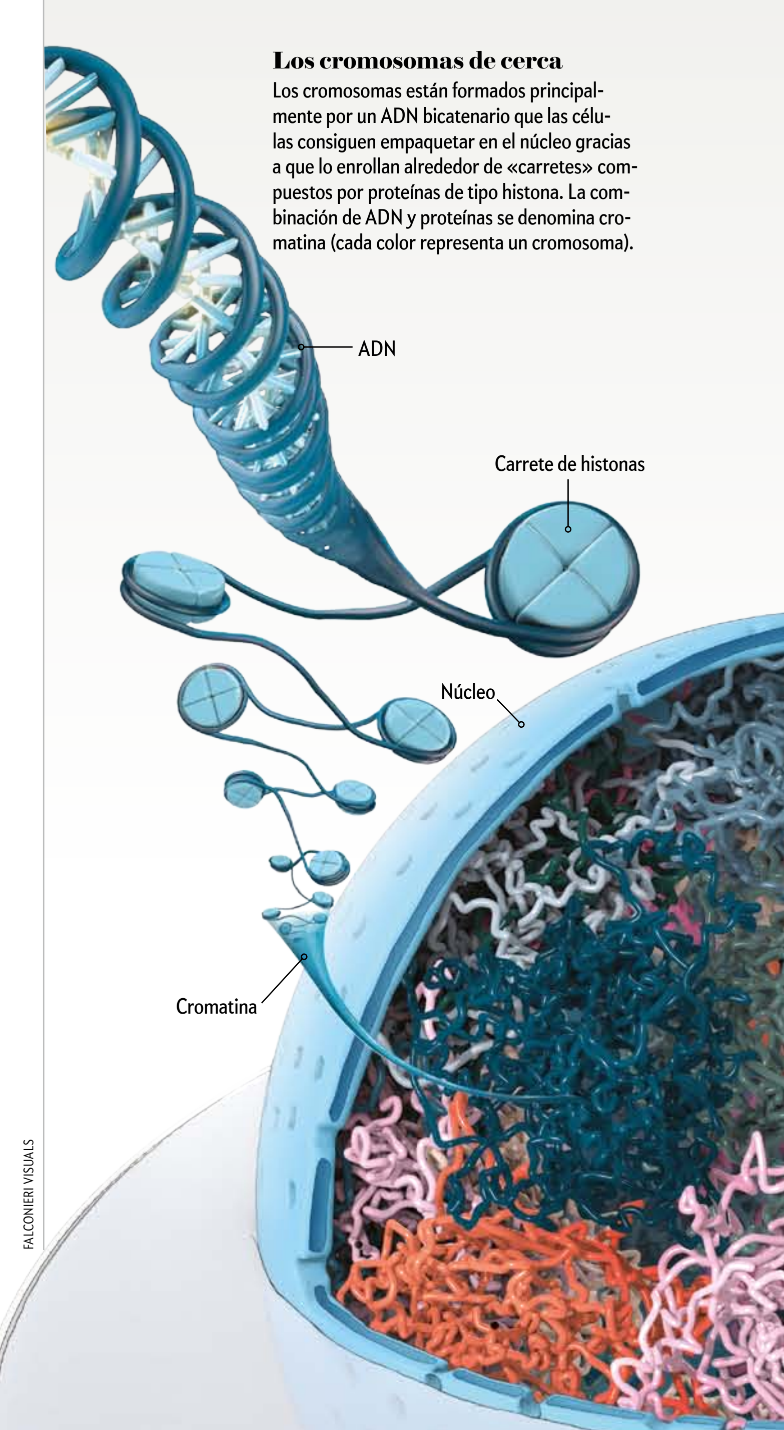
Después sí que nos tropezamos con algo verdaderamente insólito. Rao, Huntley y yo le pedimos a Ido Machol, un nuevo investigador computacional del laboratorio, que estudiara la distribución de las histonas (las proteínas que ayudan a empaquetar el ADN dentro del núcleo) cerca de las moléculas del CTCF. Machol se dio cuenta de que había más histonas del lado externo de los lazos que del interno, como si las histonas supieran de algún modo dónde se situaba el lazo con respecto a las moléculas de CTCF. Pensé que el hallazgo se debía a un error de programación en el código desarrollado por Machol, pero pasaban las semanas y este no daba con ningún fallo.

Comenzamos a buscar una explicación biológica. En el artículo original en el que se describía el descubrimiento del CTCF, Lobanenkov había demostrado que no se unía a cualquier lugar del ADN, sino solo a una palabra concreta, esto es, una

ASÍ FUNCIONAN LOS LAZOS

El genoma enlazado

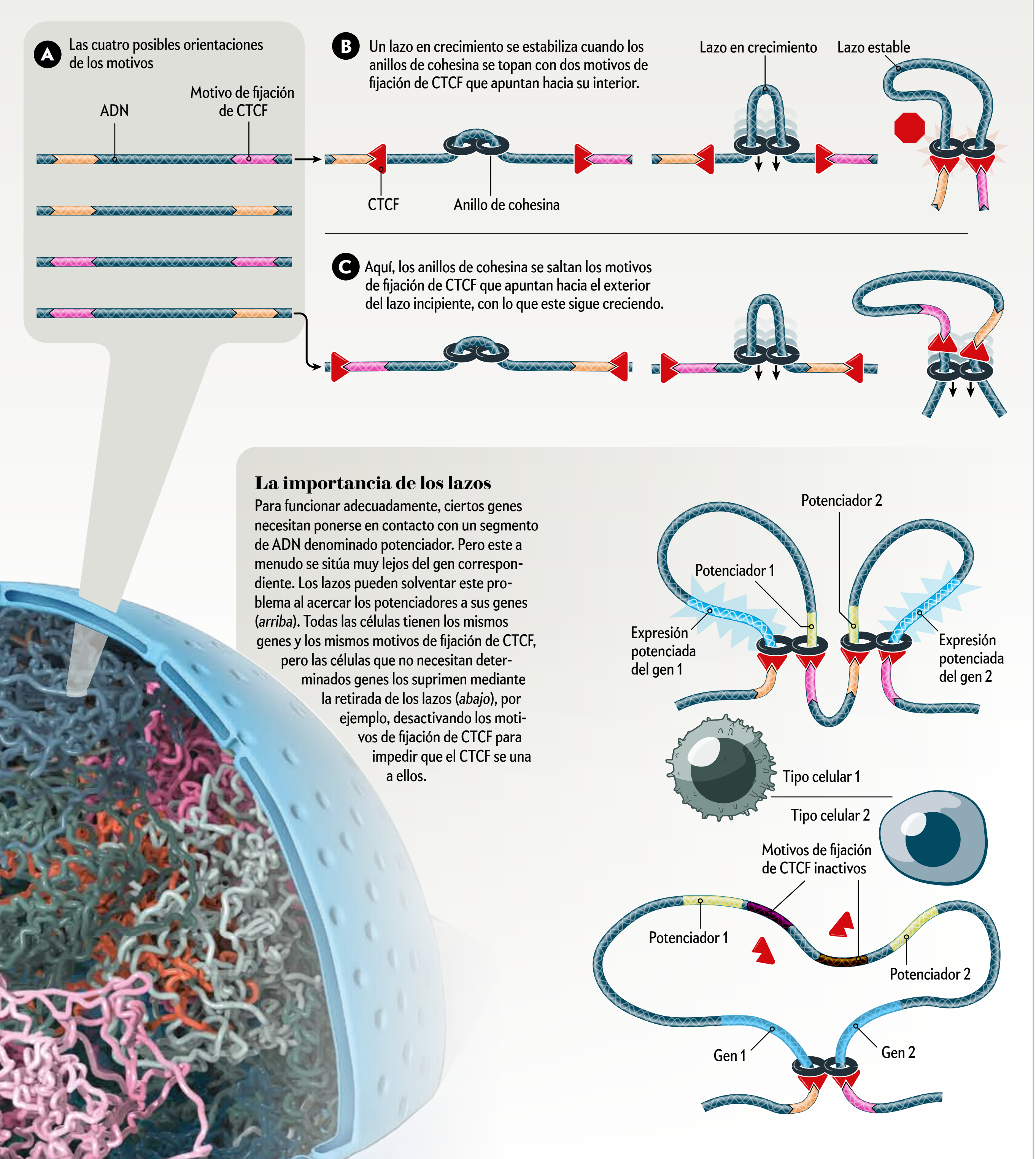
Visto al microscopio, el genoma de una célula (el conjunto de sus cromosomas) recuerda a una maraña de tallarines, aunque su organización dista mucho de ser aleatoria. Una resolución más precisa que la mostrada aquí abajo nos revelaría que el genoma se pliega en unos 10.000 lazos que no se enredan entre sí. Los estudios recientes han descubierto un proceso clave para la formación de los lazos denominado extrusión (*arriba a la derecha*). Ayudan a determinar qué genes se expresan o se activan en las células (*abajo a la derecha*), con lo que influyen en las funciones que estas realizan.



FALCONIERI VISUALS

Formación de los lazos

La extrusión de los lazos comienza cuando un «complejo de extrusión» va a parar sobre el ADN. Este crece a medida que las dos subunidades enganchadas del complejo, que incluyen una estructura anular denominada cohesina, se deslizan en direcciones opuestas. Un factor proteico llamado CTCF detiene el crecimiento del lazo en determinadas condiciones. El CTCF se une a una secuencia concreta del ADN que apunta en uno de los dos sentidos posibles **A**. Cuando un anillo de cohesina se topa con un CTCF unido a un motivo que apunta hacia el interior del lazo, la subunidad dejará de deslizarse. Si encuentra un CTCF que apunta hacia el otro lado, prosigue su camino. Si ambos anillos se encuentran con proteínas CTCF que apuntan hacia dentro, se detendrán ambos y anclarán el lazo en esta posición **B**. En cualquier otra orientación, el lazo continuará creciendo **C**.



La importancia de los lazos

Para funcionar adecuadamente, ciertos genes necesitan ponerse en contacto con un segmento de ADN denominado potenciador. Pero este a menudo se sitúa muy lejos del gen correspondiente. Los lazos pueden solventar este problema al acercar los potenciadores a sus genes (*arriba*). Todas las células tienen los mismos genes y los mismos motivos de fijación de CTCF, pero las células que no necesitan determinados genes los suprimen mediante la retirada de los lazos (*abajo*), por ejemplo, desactivando los motivos de fijación de CTCF para impedir que el CTCF se una a ellos.

secuencia específica de unas 20 bases denominada motivo. Dado que el ADN es una doble hélice formada por dos hebras, los motivos pueden aparecer en cualquiera de ellas y señalar hacia alguno de los extremos del inmenso tallarín que es el ADN. La orientación relativa de los motivos del ADN suele ser aleatoria, como cuando se lanza una moneda al aire: la mitad de las veces un motivo típico señalará hacia un extremo y la otra mitad, hacia el otro. Por eso, al principio esperábamos ver que los motivos de fijación del CTCF en los anclajes de los lazos tuvieran orientaciones aleatorias.

Nos preguntábamos si los motivos de fijación de CTCF en los anclajes de los lazos daban a las histonas la clave de dónde debían conectarse al ADN cerca de los motivos. Lo comprobamos y, para nuestro asombro, los dos diminutos motivos de fijación del CTCF, aunque estuvieran separados por millones de letras en un ADN sin plegar, siempre se señalaban mutuamente hacia el interior del lazo, en lo que denominamos una orientación convergente. Esta regla convergente explicaba cómo podían saber las histonas dónde colocarse por sí solas: solo tenían que determinar hacia qué lado señalaba el motivo de fijación del CTCF.

Pero al resolver este rompecabezas, la regla convergente había creado un segundo misterio aún mayor, porque la falta de aleatoriedad en la orientación de los motivos rompía las expectativas. Para entenderlo mejor, multipliquemos de nuevo el genoma por un factor de un millón para que los motivos midan cada uno cinco milímetros de longitud y estén separados entre sí por un kilómetro del tallarín genómico. Pues bien, los motivos en los extremos opuestos de un tramo de ADN que formaba un lazo seguían, de algún modo, apuntándose el uno al otro como si estuvieran guiados por una brújula mágica. Como cualquier buen truco de magia, la regla convergente parecía imposible y también contradecía la idea aceptada sobre cómo se formaban los lazos.

La regulación génica puede ser un efecto secundario de los lazos, mientras que la función principal de estos en las células quizá sea otra

Por entonces, casi todo el mundo (incluidos nosotros mismos) creía que los lazos se formaban por difusión. Según esa idea, una proteína necesaria para crear un lazo se fija en un extremo de un tramo del ADN y, luego, otra proteína que facilita los lazos se fija al otro extremo. A continuación, como es habitual, el ADN se agita y si, al final, este ajetreo acerca las dos proteínas, forman un enlace físico con el que crean un lazo. El problema es que a lo largo de la cadena de ADN hay demasiadas posibilidades de agitación, por lo que, si fuera correcto el modelo de difusión, no importaría la orientación relativa de los motivos de fijación de CTCF y seguiríamos viendo una convergencia. Ese mismo año, el equipo de Suzana Hadjur, del Colegio Universitario de Londres, y el de Yijun Ruan, del Laboratorio Jackson en Connecticut, confirmaron la regla convergente con sus propios conjuntos de datos. La regla había llegado para quedarse y los lazos que veíamos no podían formarse por difusión.

LE ECHAMOS EL LAZO

Si los lazos no se formaban por difusión, entonces ¿cómo aparecían? ¿Qué función desempeñaban el CTCF y la cohesina? Hicimos igual que siempre cuando nos enfrentamos a una pregunta crítica sobre el plegamiento del genoma: comenzamos a jugar con el cable de los auriculares.

Estoy casi seguro de que la mayoría de las personas que investigan el plegamiento del genoma tienen a mano algo parecido a un tallarín largo: un trozo de cuerda o un tubo de plástico. Cuando nos atascamos ante un problema difícil, echamos mano de este objeto para dejar pasar el tiempo. Un día, Rao y yo estábamos pasándonos los auriculares una y otra vez mientras explorábamos los posibles modelos de formación de lazos. De repente, se nos ocurrió que la respuesta no estaba en los auriculares, sino en las mochilas.

Pensemos en el mecanismo que ajusta la longitud de los tirantes de la mochila. Se basa en un objeto, denominado hebilla deslizante, que está formado *grosso modo* por dos anillos pegados entre sí. El tirante entra por el primer anillo y sale por el segundo. Si deseamos ajustar la longitud del tirante, tiramos de él por uno de los anillos, con lo que empezará a formarse un lazo que iremos agrandando hasta alcanzar un remate que nos detenga.

¿Podrían los pares de anillos de cohesina funcionar como estas hebillas deslizantes? En primer lugar, se unen en cualquier posición del genoma, de manera que el ADN entra por un anillo y sale por el otro. Por otra parte, los dos anillos se deslizan en sentido opuesto (uno hacia la izquierda a lo largo de la molécula lineal y el otro hacia la derecha), con lo que extruden un lazo que crece a medida que avanzan. Pero no se deslizan indefinidamente, sino que uno de ellos acabará acercándose a un punto donde estará fijada una molécula de CTCF. Si el motivo de fijación reconocido por el CTCF señala hacia el anillo que se le aproxima, cuando entren en contacto el deslizamiento se detendrá. En cambio, si el motivo mira hacia el otro lado, la cohesina lo ignora y prosigue su viaje. De este modo, un motivo de fijación de CTCF es como una señal de STOP para las cohesinas: si se la encuentran de frente, tienen que parar, pero si mira hacia otro lado, no hay que hacerle caso. El segundo anillo también se sigue desplazando hasta que llegue a un motivo de fijación de CTCF que apunte hacia el interior, con lo que se acaba de completar el lazo.

Si los anillos de cohesina funcionasen realmente de esta manera, entonces los lazos se crearían solo entre las parejas de motivos de fijación de CTCF que satisfacieran la regla convergente. Enseguida nos dimos cuenta de que las células se beneficiarían enormemente de un proceso de extrusión como este: si los lazos se formaran por difusión, los pares de lazos en un cromosoma se enredarían con facilidad, con lo que los cromosomas formarían nudos y se enmarañarían entre sí. Esto dificultaría el funcionamiento de los genes e impediría que los cromosomas se separasen cuando las células se dividieran. En cambio, los lazos producidos por extrusión no forman nudos ni se enredan, del mismo modo que los tirantes de la mochila no forman nudos por más que se les reajuste la longitud con la hebilla deslizante.

Nuestro modelo era pura especulación. Hicimos muchas suposiciones básicas sin la más mínima prueba directa, como la noción de que la cohesina se deslizaba por el ADN. Nos preocupaba que anduviéramos muy equivocados, pero al consultar la bibliografía sobre la cohesina, nos dimos cuenta de que el propio Nasmyth ya había propuesto en 2001 que esta podría extrudir el ADN. Sanborn ejecutó en el ordenador simulaciones detalladas que recapitulaban con bastante coincidencia los datos de nuestros mapas. Finalmente, en los experimentos de Rao

con ADN real, los lazos cambiaron exactamente del modo que predecía el modelo de Sanborn.

Si se eliminaba un motivo de fijación de CTCF en un anclaje de lazo, dicho lazo no se formaba. Si se invertía la orientación de un motivo, desaparecía el lazo original y se creaba uno nuevo del otro lado. La adición de un motivo de fijación de CTCF (siempre que apuntase hacia el lado correcto) también daba lugar a la formación de un lazo nuevo. Nos encontramos así con que podíamos añadirlos y retirarlos de un genoma a voluntad.

Rápidamente escribimos y enviamos un artículo sobre nuestro modelo de extrusión y los experimentos de manipulación de los lazos que habíamos realizado para comprobarlo. El tema se estaba caldeando y, a finales de 2015, con pocas semanas de separación, nuestro laboratorio y otros dos equipos publicamos artículos que demostraban la validez de esta conducta tridimensional del genoma. De igual forma, tres equipos (el nuestro, otro en la Universidad Emory en Atlanta y el tercero en el MIT) describimos que la regla convergente apoyaba el modelo de formación de lazos por extrusión. Al final, la comunidad científica estaba comenzando a desenredar la lógica de los lazos.

El progreso continuó a un ritmo vertiginoso. En los Institutos Gladstone en San Francisco, Benoit Bruneau y sus colaboradores demostraron que cualquier alteración del CTCF debilitaba enormemente los lazos. En el Laboratorio Europeo de Biología Molecular, François Spitz y sus colaboradores obtuvieron un resultado similar al eliminar una proteína que parecía cargar la cohesina en el ADN. En el Instituto del Cáncer de los Países Bajos, el equipo de Benjamin Rowland demostró que al eliminar un factor que retiraba la cohesina del ADN se formaban lazos más grandes, en principio debido a que el anillo podía llegar ahora mucho más lejos. En nuestro laboratorio, Rao demostró que la degradación de la propia cohesina hacía desaparecer en pocos minutos todos los lazos en los que esta participaba.

Pero todos buscábamos una confirmación directa: ver la extrusión en acción. Por fin, en abril de 2018, Cees Dekker y sus colaboradores de la Universidad Politécnica de Delft dieron con ella. Grabaron al microscopio una película de la condensina de la levadura (un complejo de proteínas que está muy relacionado con la cohesina) que muchos de los que trabajamos en el campo de la arquitectura nuclear no olvidaremos nunca. Primero se ve una cinta de ADN sobre la que se posa la condensina para formar un pequeño nódulo de ADN. El nódulo crece y crece hasta que el espectador se da cuenta de lo que es en realidad: un lazo extrudido.

IMPLICACIONES PARA LA SALUD

A medida que se van conociendo los mecanismos y las reglas sobre la formación de los lazos, la importancia que ello tiene para la salud y la enfermedad está cada vez más clara. Frederick Alt, de la Universidad Harvard, y sus colaboradores han comenzado a articular la influencia de los lazos en la producción de anticuerpos. Nuestro organismo fabrica anticuerpos frente a los patógenos que no ha visto nunca antes mediante el corte y el empalme de segmentos del gen que los codifica. El equipo de Alt halló que este proceso se lleva a cabo gracias a la formación de muchos lazos anclados con CTCF y su posterior recorte.

El laboratorio de Stefan Mundlos del Instituto Max Planck de Genética Molecular, en Berlín, ha demostrado que la modificación de un solo motivo de fijación de CTCF en los ratones hace que estos animales desarrollen un número anómalo de dedos en las patas. Los humanos con un cambio equivalente tampoco tienen cinco dedos. Rafael Casellas, de los Institutos Nacionales de la Salud de EE.UU. (NIH), ha demostrado que la alteración de los motivos de fijación de CTCF en un plasmacitoma (una clase de cáncer) de ratón podía retrasar el crecimiento del tumor hasta un 40 por ciento.

A medida que la idea de la extrusión de los lazos gana credibilidad, van descartándose las teorías más arraigadas sobre su función en la regulación génica. Desde hacía décadas se pensaba que los lazos actuaban como interruptores: un gen se activaría cuando se formara un lazo entre su promotor y un potenciador. Por tanto, cabía esperar que la retirada de la cohesina de las células desbarataría la expresión génica y miles de genes cambiarían su nivel de actividad. Y, en efecto, así sucedía: muchos genes modificaban su nivel de expresión, pero los cambios eran bastante pequeños. Después de todo, los lazos, al menos los formados por extrusión, no son interruptores binarios, sino que parecen funcionar como pulsadores que activan o desactivan un poco la actividad génica, con lo que afinan el suministro celular de las distintas proteínas.

En otras palabras, la naturaleza nos ha enredado. Pensábamos que conocíamos las reglas del juego con el que los lazos activaban los genes. Pero ahora que los hemos visto funcionar, debemos reconocer que nuestra visión era demasiado simplista. Incluso podría ser que la regulación génica fuera un efecto secundario de los lazos, mientras que la función principal de estos en las células quizá sea otra.

Al igual que cualquier explorador en un territorio ignoto, necesitamos mejores mapas. En el proyecto ENCODE (Enciclopedia de elementos del ADN) de los NIH, Ruan y yo estamos trabajando con nuestros colaboradores para crear el primer atlas de lazos del genoma humano, mediante su cartografiado en todos los tejidos del organismo. Nuestros grupos y muchos otros nos hemos unido también en el consorcio del Nucleoma 4D, en el que se están desarrollando nuevos métodos para abordar estos problemas. Olga Dudchenko, estudiante posdoctoral de mi laboratorio, ha creado el Zoo del ADN, un consorcio de laboratorios académicos, zoológicos y acuarios de todo el mundo que está intentando ensamblar el genoma de cientos de especies para describir la evolución de los lazos a través del árbol de la vida.

Para los investigadores, el final de una historia científica es siempre el comienzo de otra. Hace dos mil millones de años, antes de la aparición del núcleo de la célula, surgió el proceso de extrusión del ADN. ¿Por qué? Una vez más, tenemos un nuevo embrollo por resolver. IyC

PARA SABER MÁS

Interaction between transcription regulatory regions of prolactin chromatin. K. E. Cullen, M. P. Kladde y M. A. Seyfred en *Science*, vol. 261, págs. 2003-2006, 9 de julio de 1993.
A 3D map of the human genome at kilobase resolution reveals principles of chromatin looping. Suhas S. P. Rao et al. en *Cell*, vol. 159, n.º 7, págs. 1665-1680, 18 de diciembre de 2014.
Chromatin extrusion explains key features of loop and domain formation in wild-type and engineered genomes. Adrian L. Sanborn et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, volumen 112, n.º 47, págs. E6456-E6465, 24 de noviembre de 2015.
Real-time imaging of DNA loop extrusion by condensin. Mahipal Ganji et al. en *Science*, volumen 360, págs. 102-105, 6 de abril de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

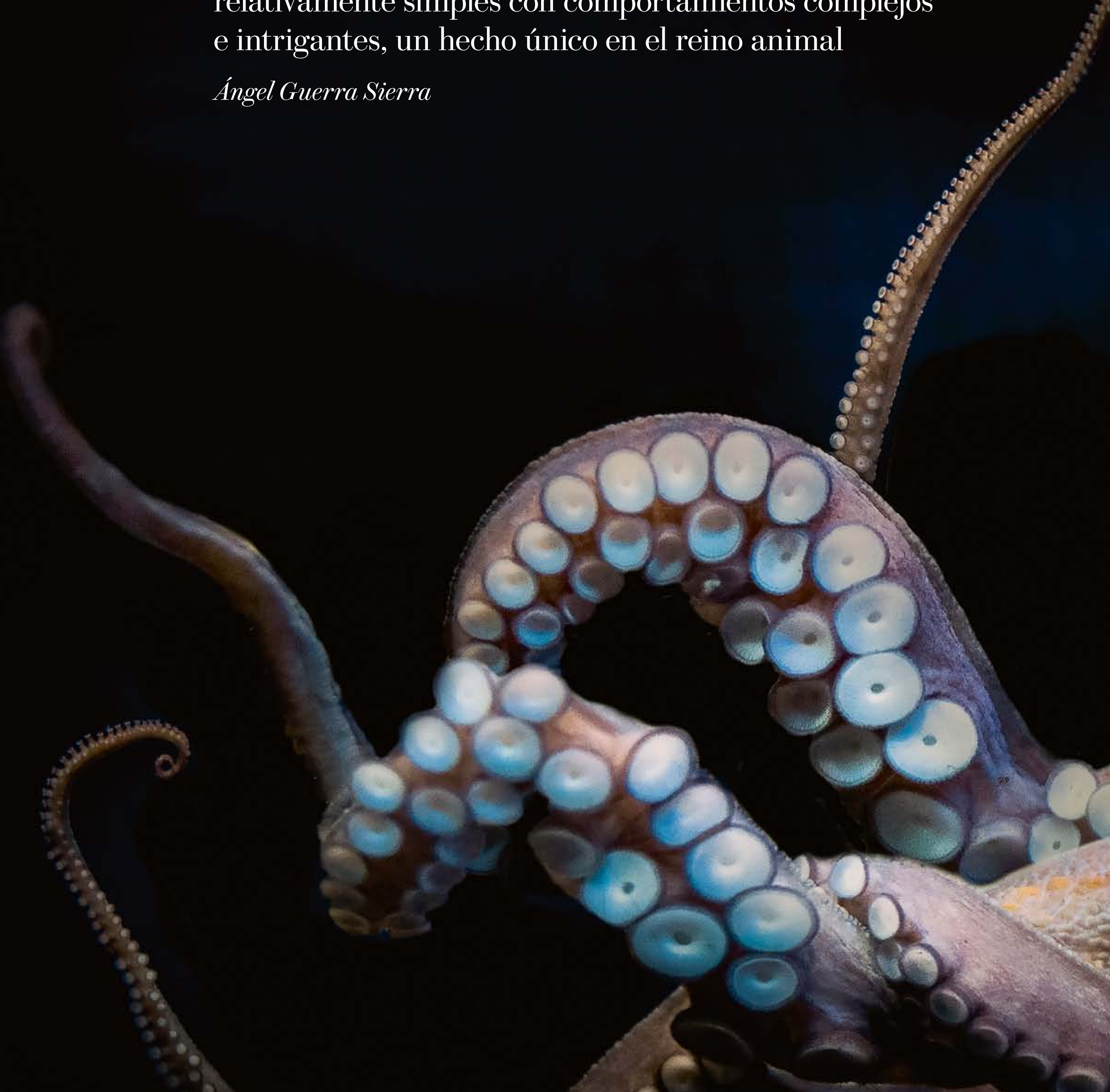
La vida interior del genoma. Tom Misteli en *IyC*, abril de 2011.
Viaje al interior del genoma. Stephen S. Hall en *IyC*, diciembre de 2012.
La función reguladora del genoma. Rafael R. Daga, Silvia Salas-Pino y Paola Gallardo en *IyC*, diciembre de 2013.

COMPORTAMIENTO ANIMAL

El INGENIO *de los*

Sepias, calamares y pulpos combinan sistemas nerviosos relativamente simples con comportamientos complejos e intrigantes, un hecho único en el reino animal

Ángel Guerra Sierra



CEFALÓPODOS

EN SÍNTESIS

Los cefalópodos son invertebrados marinos con una inteligencia fascinante. Despliegan asombrosos cambios de coloración y textura de la piel, de forma y postura, y muestran una excelente capacidad para resolver problemas y para aprender.

A pesar de su complejo comportamiento y cognición, equiparables a los de muchos vertebrados, mantienen una organización sencilla del sistema nervioso, propia de los moluscos, una combinación que resulta única en la naturaleza.

Sus capacidades se deben al desarrollo de unos excelentes órganos de los sentidos y de un cerebro formidable, cuyo estudio ha abierto nuevas líneas de investigación en neurología y etología.



Ángel Guerra Sierra, doctor en biología, es profesor de investigación emérito del Instituto de Investigaciones Marinas de Vigo, del CSIC. Su ámbito de investigación es la ecología marina y los recursos naturales, con especial énfasis en el estudio de los cefalópodos. Destacan sus libros, trabajos científicos, conferencias y artículos de divulgación en este campo.



«Vivir rápido y morir jóvenes» se ha convertido en la descripción más popular de la vida de los cefalópodos, que no suele prolongarse más allá de los dos años. Aunque, teniendo en cuenta las variadas y complejas conductas de estos animales, quizá sería más apropiado decir: «Vivir rápido y morir jóvenes, pero ingeniosamente».

Estos peculiares moluscos de 500 millones de años de antigüedad comprenden los nautilos, las sepias, los sepiólidos o globitos (con diez brazos como las sepias, pero de menor tamaño, cuerpo globoso y dos aletas con forma de oreja), calamares y pulpos. En conjunto suman unas 800 especies vivientes. Todas son marinas, con representantes en todos los mares del mundo, del Ártico a la Antártida, de la zona intermareal a la mitad del océano y de las aguas superficiales a las grandes profundidades. Presentan formas y tamaños corporales y estilos de vida muy diversos. Van desde el calamar gigante, el invertebrado marino más grande del mundo [*véase* «Ecofisiología del calamar gigante», por Ángel Guerra y Ángel F. González; Investigación y Ciencia, mayo de 2010], hasta especies de menos de dos centímetros de longitud. Incluso se han adaptado a ambientes muy hostiles, como *Vulcanoctopus hydrotermalis*, que vive cerca de las fumarolas hidrotermales.

Si bien la biología y la ecología de numerosas especies de cefalópodos se conocen bastante bien desde hace tiempo, el fascinante ingenio de estos invertebrados marinos esconde todavía muchas incógnitas. Los resultados obtenidos en las investigaciones, principalmente con pulpos y sepias, demuestran que algunas especies despliegan asombrosas formas de inteligencia, equiparables a las de muchos vertebrados con cerebros bien desarrollados, aunque mantengan una organización del sistema nervioso más sencilla, propia de animales sin vértebras. Esta combinación de sistema nervioso simple y comportamiento complejo es única en la naturaleza.

Destaca la habilidad de estos animales para manipular objetos; reconocer formas, colores y texturas; escapar de trampas; mimetizarse con otros animales u objetos para defenderse de los depredadores, cazar o aparearse; aprender y memorizar con rapidez a pesar de la brevedad de su vida; relacionarse con sus cuidadores en los acuarios, y quizás hasta divertirse jugando. Todo ello lo consiguen gracias al desarrollo de unos excelentes órganos de los sentidos y de un voluminoso cerebro.

Los hallazgos más recientes están cambiando nuestra concepción de lo que significa ser inteligente y están abriendo las puertas a nuevas líneas de investigación en neurología. Los elegantes experimentos de numerosos colegas y mis experiencias personales, algunos de los cuales describo a continuación, aportan numerosos ejemplos del ingenio de estos animales.

ADVERTIR LAS SEÑALES DEL ENTORNO

Los cefalópodos poseen una gran variedad de órganos de los sentidos que les permiten detectar los diversos estímulos externos. Los más conspicuos son los ojos. Su estructura es análoga a la de los vertebrados, aunque, en lugar de presentar una retina con conos y bastoncillos, cuentan con unas membranas especializadas de células fotosensibles de forma tubular, denominadas rabdómeros, que suelen tener un solo tipo de pigmento, la rodopsina. En la cabeza y el manto (la parte dorsal del cuerpo que recubre las vísceras), presentan, además, vesículas fotosensibles que captan la luz solar, una información que aprovechan para crear un efecto de contrailuminación, como se verá más adelante.

Para percibir el efecto de la gravedad, los cefalópodos cuentan con un órgano denominado estatocisto, que sería equiparable al oído interno de los vertebrados. Está formado por dos cavidades alojadas en la región posterior e inferior del cráneo. Cada estatocisto integra dos sistemas. El compuesto por el estatolito (gránulo calcáreo) y la mácula detecta las aceleraciones lineales que se generan con el movimiento, cuando el estatolito, que flota en el líquido de la endolinfa, presiona sobre la mácula. El sistema de crestas y cúpulas, una suerte de protuberancias en las paredes de las cavidades, detecta las aceleraciones angulares que producen los giros del animal cuando la endolinfa presiona sobre ellas. Gracias a este órgano, los cefalópodos logran mantener el equilibrio y, además, pueden detectar infrasonidos.

También se ha observado que muchas especies tienen la capacidad de percibir el impacto de ondas de presión del agua circundante en la oscuridad, por ejemplo, las provocadas por el movimiento de algún depredador. Lo que consiguen mediante un sistema de líneas laterales, análogas a la de los peces.

En las ventosas de los cefalópodos se alojan distintos tipos de receptores nerviosos: los quimiorreceptores, que les permiten gustar y oler; los mecanorreceptores, que les ayudan a reconocer los objetos al tocarlos, y los propiorreceptores, con los que pueden conocer la actividad muscular propia. El olfato, no obstante, se refuerza con unas estructuras epiteliales, los rinóforos,

que son verdaderos órganos olfativos, pues están tapizadas por quimiorreceptores.

Por último, los cefalópodos poseen nociceptores en la piel, los músculos y las vísceras. Estas estructuras distinguen los cambios químicos, térmicos y mecánicos asociados al daño celular, que se perciben en forma de dolor.

RESPONDER A LOS ESTÍMULOS

De poco serviría a los cefalópodos tanta información obtenida a través de los sentidos si careciesen de cerebro y de órganos efectores apropiados para ejecutar las respuestas a las órdenes del sistema nervioso central. Los órganos efectores son muy diversos. Los locomotores permiten la propulsión a chorro, la caza, la evasión dentro del agua y el planeo fuera de ella, así como la natación lenta y estabilizada. Entre ellos cabe destacar el sistema que forman el manto y el sifón (estructura tubular por la que el animal aspira y expulsa el agua para propulsarse), con sus fibras musculares radiales y circulares, y las aletas.

Hay también varios mecanismos para la flotación. En los nautilos, la concha externa tabicada, compuesta por cámaras comunicadas por un conducto (el sifúnculo), les permite controlar la flotación según la proporción de líquido y gas contenidos en su interior. Se trata del mismo sistema con el que funcionan las conchas internas de las espírulas y las sepias. Por otra parte, la acumulación de fluidos más livianos que el agua de mar, como el cloruro amónico en los músculos o los lípidos en la glándula digestiva, favorecen la flotabilidad de numerosas especies que carecen de concha.

Las ventosas y los garfios de los brazos y tentáculos de numerosas especies sirven principalmente para el agarre de las presas en las estrategias de caza, pero también en tácticas defensivas. Además, pueden constituir caracteres sexuales secundarios, como el ensanchamiento de algunas ventosas de los brazos de los pulpos o las brácteas de los brazos de los machos adultos en la pota *Todaropsis eblanae*.

La masa bucal contiene un pico quitinoso, la rádula principal (estructura para raspar el alimento), a veces una rádula secundaria, y la glándulas salivales. Todo un dispositivo perfectamente diseñado para desgarrar las presas o perforar conchas de otros moluscos. Muchas especies segregan enzimas proteolíticas para una digestión externa de las presas, así como neurotoxinas para su paralización.

Mediante la musculatura del manto y de los brazos, los cefalópodos logran cambios en la textura de la piel. También experimentan cambios cromáticos gracias a sacos de pigmentos ubicados en la epidermis, los cromatóforos, que se contraen y relajan por la acción de los músculos adyacentes. En la coloración pueden intervenir, asimismo, células reflectoras de la dermis (iridóforos y leucóforos), cuya tonalidad depende de la luz reflejada y de la temperatura ambiental. Todas esas adaptaciones en la piel intervienen en los fenómenos de cripsis y de mimetismo (en los que el cefalópodo se confunde con el entorno o con otro organismo, respectivamente) o de aposematismo (en el que adopta coloraciones que indican un peligro), entre otros, los cuales se utilizan principalmente como estrategias de defensa, evasión, cortejo nupcial y manifestación de «estados de ánimo».

Muchos cefalópodos tienen la capacidad de emitir luz, fenómeno conocido como bioluminiscencia. Los órganos encargados de emitirla son los fotóforos, que se sitúan en los ojos, los brazos, los tentáculos, la cavidad paleal (o del manto) y la región ventral del manto. La bioluminiscencia de la región ventral, como la que produce el calamar luciérnaga, origina un efecto de contrailuminación: los fotóforos reducen el contraste de la silueta del animal contra el fondo, en este caso la superficie del mar, lo que confunde a los depredadores que nadan por debajo de él. Aparte de servir como táctica de camuflaje, quizá la función más relevante de la bioluminiscencia sea la comunicación entre congéneres.

Otra eficaz estrategia de evasión es la expulsión de tinta desde una bolsa que forma parte del sistema digestivo. Cuando la expulsa, el animal logra desorientar a sus atacantes, ya sea originando un «fantasma» de sí mismo o anulando los órganos sensoriales de los depredadores.

Por último, los cefalópodos cuentan con las glándulas ópticas que segregan hormonas gonadotrópicas, relacionadas con la maduración sexual de las gónadas y el desarrollo de caracteres sexuales secundarios. Entre ellos cabe mencionar el hectotilo, un brazo modificado en los machos que se encarga de traspasar el semen a la hembra, o ventosas agrandadas, empleadas por varias especies de pulpos en los cortejos nupciales.

EL CEREBRO MÁS COMPLEJO

El sistema nervioso central de los cefalópodos es el más complejo de todos los invertebrados. La relación entre el volumen cerebral y el corporal es mayor en ellos que en la mayoría de los peces, anfibios y reptiles. Excepto los nautilos, que poseen un cerebro simple y primitivo, el resto de los cefalópodos presentan un cerebro grande, protegido por un cráneo cartilaginoso, que rodea al esófago y se divide en dos regiones encefálicas: la subesofágica (por debajo del esófago) y la supraesofágica (por encima de él). Está altamente organizado y constituido por numerosos lóbulos (concentraciones ganglionares de células nerviosas), que pueden llegar hasta la cifra de 40. Algunos procesan los estímulos sensoriales, otros organizan la actividad motora y otros participan en la modificación del comportamiento. Sin



JOSÉ LUIS GONZÁLEZ

ESTE PULPO BLANCO (*Eledone cirrhosa*), que vive en aguas del Mediterráneo y del Atlántico nororiental, está camuflándose en la arena. El vídeo filmado mostró que, con la ayuda del cuerpo y los brazos, el pulpo se enterró por completo, excepto los ojos, en menos de 50 segundos.

embargo, la arquitectura fina del cerebro de sepias, calamares, potas y pulpos varía en cierta medida con la edad, el hábitat y el modo de vida. El cerebro mejor conocido es el del pulpo común (*Octopus vulgaris*).

La información existente sobre la estructura y las funciones del cerebro de los cefalópodos se debe, principalmente, a John Z. Young y Marion Nixon, del Colegio Universitario de Londres. En 2003, cuando ya había fallecido Young, Nixon publicó el libro *The brains and the lives of cephalopods*, donde se recoge el fruto del trabajo de ambos. Describieron así que el cerebro del pulpo común presenta unos 170 millones de neuronas. El 76,3 por ciento de ellas se alojan en los dos enormes lóbulos ópticos, que gestionan y controlan los movimientos oculares y la visión.

Los lóbulos subesofágicos (paleovisceral, cromatofóricos, braquial, vasomotores y pedio) del pulpo contienen el 1,5 por ciento de las células nerviosas y controlan la actividad de los músculos de las vísceras, el manto, los brazos y los tentáculos, así como los que rodean a los cromatóforos.

Los lóbulos supraesofágicos, que albergan el 21,8 por ciento de las neuronas, están estrechamente relacionados con la respuesta a los estímulos quimiotáctiles procedentes de los brazos y de la boca. Gestionan las acciones exploratorias, el aprendizaje y la memoria. En el pulpo, se han distinguido varios de estos lóbulos, cada uno especializado en un tipo de acción. Gestionan funciones tan diversas como la defensa, el rechazo, la detección de presas, el ataque e incluso la alimentación. Asimismo, intervienen en el control de las posturas del animal y los movimientos de la cabeza y los ojos, así como en los movimientos del manto y el sifón.

Por último, fuera ya del cerebro propiamente dicho, hallamos el lóbulo magnocelular, que contiene el 0,40 por ciento de las neuronas. Este centro motriz intermedio, situado entre los lóbulos subesofágicos, gestiona las reacciones de defensa y escape. En el lóbulo magnocelular de los decapodiformes (sepias, calamares y potas) se origina el sistema de fibras nerviosas gigantes.

¿TIENEN LOS PULPOS DOS CEREBROS?

Un rasgo muy característico de los cefalópodos (y de los moluscos en general) es la gran importancia del sistema nervioso periférico. Su excepcional desarrollo les ofrece enormes posibilidades. Los brazos y los tentáculos provistos de ventosas inervadas intervienen en numerosas funciones motoras (movimiento del animal), mecánicas (movimiento de las extremidades), quimiorreceptoras (percepción de sustancias del entorno) y propiorreceptoras (percepción de la postura). Además, a diferencia de muchos invertebrados, pueden controlar la musculatura sin tener varios segmentos independientes unidos por articulaciones.

Cuando se observa a un pulpo manipular con sus ventosas distintos objetos, construir cubiles en fondos blandos, reptar, caminar sobre dos brazos mientras mantiene los demás en otras posiciones, extender un brazo para introducirlo en una grieta en busca de una presa, o adoptar posturas de acecho, cortejo nupcial y otras, uno no puede por menos que preguntarse qué tipo de sistema nervioso es capaz de controlar semejante flexibilidad y versatilidad. Pero la sorpresa es aún mayor cuando se comprueba que un pulpo descerebrado y ciego puede todavía diferenciar estímulos táctiles, manipular objetos e incluso comportarse casi con normalidad.

Para comprenderlo, es preciso conocer la estructura y el funcionamiento de su sistema nervioso braquial. Cada ventosa del brazo de un pulpo posee un anillo carnoso con decenas de miles de propio-, quimio- y mecanorreceptores. Los axones de dichos receptores conectan con un ganglio de la ventosa, dotado de un gran número de neuronas y de un neuropilo (concentración de terminaciones nerviosas y otras células auxiliares) muy desarrollado. Dicho ganglio posee, además, neuronas que inervan los músculos. Así, entre la ventosa y el ganglio se forma un arco reflejo local que recibe estímulos, gestiona información y produce el movimiento y la orientación de cada ventosa. Estos ganglios no están asociados directamente entre sí, sino a través de los ganglios braquiales, que forman un cordón nervioso que discurre a lo largo de cada brazo. La conexión de cada segmento o módulo del brazo correspondiente a cada ventosa, realizada a través de los ganglios braquiales, forma un verdadero plexo nervioso que se halla enlazado con el cerebro. Dicho plexo no solo conecta todas las ventosas de un brazo, sino, además, todos los brazos entre sí. Como ha señalado Frank W. Grasso, del Colegio Brooklyn de la Universidad de Boston, la conectividad del brazo de un pulpo puede concebirse como una red modular de ganglios braquiales locales (RMBL). Esta estructura modular se repite a lo largo de todos y cada uno de los brazos y permite la coordinación de todos los movimientos de estos.

De la complejidad de la RMBL da una idea el número de células nerviosas que forman cada módulo, que se aproxima a las 100.000. Ello sin considerar las que gestionan la expansión y la contracción de las células pigmentarias de la piel y los vasos sanguíneos. Pese a su complejidad, en cada módulo braquial no existen áreas anatómicas funcionales, como las que hay en el cerebro. Sin embargo, Grasso y sus colaboradores indican que este sistema modular posee una estructura equiparable a la médula espinal de los vertebrados. También postulan que la RMBL es capaz de formar representaciones del mundo que rodea al pulpo con independencia de los impulsos cerebrales. Pero ¿cómo lo consigue? Según estos investigadores, gracias a que esta red ofrece suficiente información sensorial y a que forma una magnífica y ordenada topología.

Grasso y su equipo señalan que, además de ofrecer información sobre el espacio, la RMBL opera de modo parecido a un sistema de control distribuido. En este, la responsabilidad de la gestión de las distintas partes de un proceso no está centralizada, sino asignada a varios controladores locales distribuidos por toda la instalación, conectados entre sí y con otros centros mediante una red. Tal red se halla conectada con el cerebro, de manera que existen dos formas de control y ajuste simultáneas: una cerebral, amplia y generalista, y otra braquial, más sutil y especializada.

Aunque la RMBL de un pulpo no coincida exactamente con lo que se considera un cerebro, desde el punto de vista neuroanatómico se le asemeja bastante, teniendo en cuenta la diversidad de comportamientos que genera, gestiona e incluso memoriza. Uno de los aspectos que diferencia la RMBL de un verdadero cerebro es que aquella carece de mapas somatotópicos, los que vinculan cada región del cuerpo con una región del cerebro. Sin embargo, esta carencia se da también en todos los animales de cuerpo blando, flexible y multiforme, como gusanos marinos y babosas de mar, excepto en los lóbulos ópticos, donde hay una representación retinotópica.

Puede afirmarse, por tanto, que la RMBL actúa como un sistema semiautónomo de generación de comportamientos. Esta perspectiva esclarece algunos aspectos de la capacidad de los brazos para ejercer diferentes funciones, aunque no explica cómo informa este sistema sobre el estado del mundo exterior en ausencia de mapas somatotópicos.

La suposición de que el pulpo presenta dos cerebros (el que forman los lóbulos encerrados en el cráneo, por un lado, y el

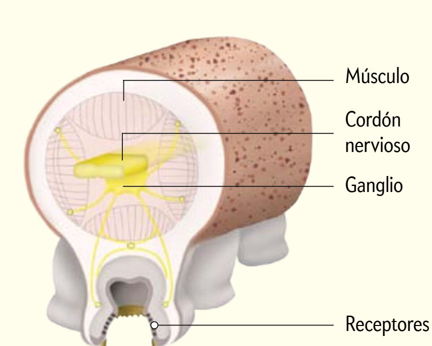
Capacidad para sentir y reaccionar

Las variadas y sorprendentes conductas que muestran los cefalópodos, como los calamares (*abajo*), se sustentan en un sistema nervioso eficaz que les permite percibir los estímulos del entorno y responder rápidamente a ellos. Además de un cerebro voluminoso, cuentan con una red periférica de ganglios y neuronas muy desarrollada, capaz de gestionar funciones de forma no centralizada, tanto del manto como de los brazos y los tentáculos.

Manto

Ventosas

Poseen receptores sensoriales conectados a ganglios (concentraciones de neuronas) que gestionan el gusto, el olor, el tacto y la posición de la ventosa. Los ganglios de todas ellas están unidos entre sí por un cordón.



Axones gigantes

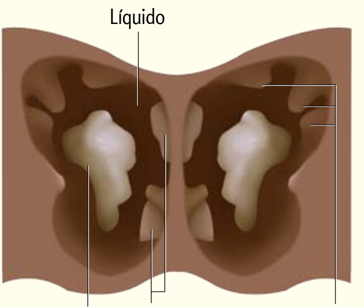
Inervan la musculatura del manto y contribuyen a la rápida reacción de la propulsión a chorro.

Rinóforos

Son unas estructuras epiteliales dotadas de quimiorreceptores que detectan el olor.

Cerebro

Está compuesto por numerosos lóbulos que se especializan en distintas funciones, desde la defensa y el ataque hasta la alimentación. Son el centro del aprendizaje y la memoria.



◄ Estatocistos

Son los órganos del equilibrio. Están formados por cavidades llenas de líquido, en el que flotan los estatolitos (concentraciones calcáreas), y recubiertas por protuberancias inervadas: máculas, cúpulas y crestas. Los movimientos lineales se perciben cuando el estatolito presiona sobre la mácula, y los giratorios, cuando el líquido presiona sobre las cúpulas y las crestas.



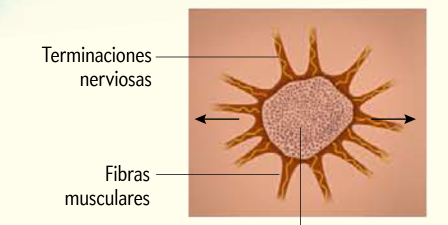
Red modular local

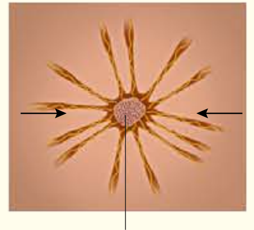
El cordón de ganglios atraviesa el brazo y forma una red que conecta todos los brazos y sus fibras musculares. Esta red modular permite coordinar los movimientos de los brazos de forma local e independiente al cerebro.



◄ Fotóforos

Son órganos que generan bioluminiscencia, que se emplea para la comunicación entre congéneres. El calamar luciérnaga (*izquierda*), que presenta muchos en todo el cuerpo, crea con ellos un efecto de contrailuminación que le permite camuflarse de los depredadores que nadan por debajo de él.





◄ Cromatóforos

Son células con pigmentos de distintas tonalidades. Al relajarse (*izquierda*) o contraerse (*derecha*) por la acción de fibras musculares y terminaciones nerviosas unidas a ellas, los pigmentos quedan expuestos u ocultos, respectivamente, lo que origina cambios cromáticos en la piel.

MIKEL RODRÍGUEZ HIDALGO

plexo braquial, por otro) se halla abierta al debate, y en él juega una importante baza lo que se entiende por «cerebro» y por «cognición». A pesar de esa controversia, no cabe duda de que los aproximadamente 2400 ganglios y las cerca de 100.000 neuronas de la RMBL que interaccionan para producir comportamientos coherentes en unos brazos flexibles, que no se enrollan nunca entre sí y que poseen más de 500 ventosas, constituyen un sistema muy sobresaliente. Tanto que estos maestros de las formas son fuente de inspiración para la biomecánica, la informática y la inteligencia artificial [*véase* «Cómo construir un robot pulpo», por Katherine Harmon; Investigación y Ciencia, abril de 2014].

El sistema periférico mejor conocido es el de los axones gigantes, que inervan la musculatura del manto en tres pasos desde los lóbulos magnocelular y paleovisceral del cerebro. Estos axones tienen un diámetro de entre 0,5 y 1 milímetros (mil veces mayor que los axones de los mamíferos). Su capacidad de reacción es tan elevada que la transmisión nerviosa discurre a gran velocidad, permitiendo la extremadamente rápida, completa e instantánea reacción de la musculatura paleal para dar lugar al incomparable invento hidrodinámico de la propulsión a chorro.

DOS TIPOS DE MEMORIA

A mediados del siglo xx, el investigador John Messenger, de la Universidad de Cambridge, demostró que en la sepia había dos procesos de almacenamiento de los recuerdos: una memoria a corto plazo y otra a largo plazo. Posteriormente, el grupo de investigación en etología animal y humana de la Universidad de Caen, liderado por Ludovic Dickel, demostró que la memoria a corto plazo aparece ya en individuos de ocho días, aunque su tiempo de retención no sobrepasa los 60 minutos. También reveló que la de largo plazo se halla operativa en individuos de un mes de edad. Es decir, existe un lapso temporal entre el establecimiento de los dos tipos de memoria durante el desarrollo postembrionario. Por otra parte, se observó que esta modificación de la memoria se debe a la maduración paulatina del complejo de los lóbulos verticales del cerebro, que dobla su tamaño durante el primer mes de vida del animal.

Binyamin Hochner y sus colaboradores, de la Universidad Hebrea de Jerusalén, arrojaron nueva luz sobre el tema. En experimentos con *Octopus vulgaris* descubrieron que se produce una potenciación sináptica robusta a largo plazo que guarda relación con la actividad en el complejo sistema de los lóbulos verticales del cerebro, un proceso sorprendentemente similar al del cerebro de los vertebrados. Esa potenciación desempeña un papel sustancial en el aprendizaje y en la generación de los dos tipos de memoria. Su existencia en un invertebrado indica que se trata de un proceso eficaz en niveles filogenéticos muy tempranos. Hochner demostró también que, al igual que en los mamíferos, los dos tipos de memoria del pulpo se segregan en sendos subsistemas en los lóbulos verticales. Aunque todavía no se entiende por completo cómo se interconectan ambos subsistemas, su organización muestra una complejidad inusitada: los dos trabajan en paralelo, pero no de forma independiente. El subsistema de la memoria a largo plazo, además de almacenar recuerdos duraderos por medio de la potenciación sináptica, regula la velocidad a la que el subsistema de la memoria a corto plazo adquiere recuerdos.

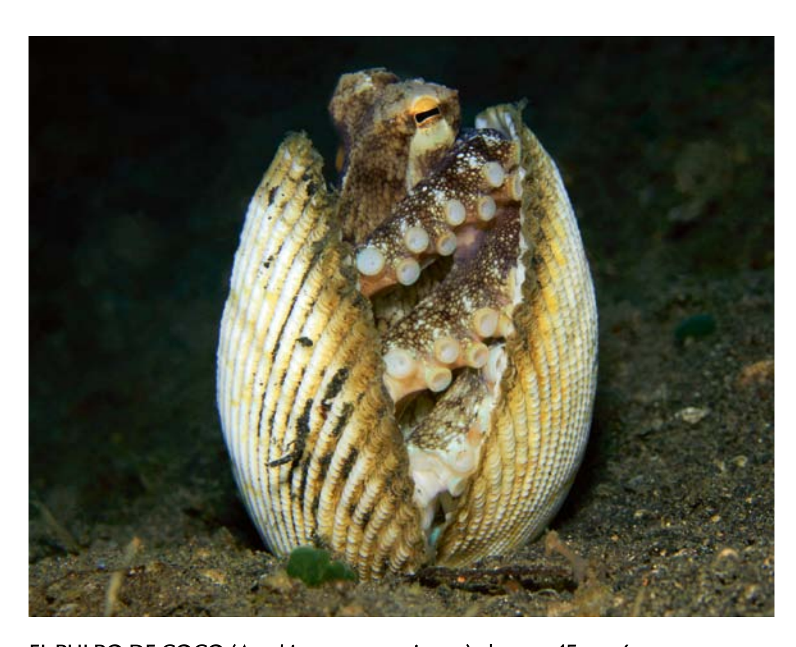
Adquirir recuerdos de corta duración, aunque sean lábiles, probablemente sea una estrategia útil para la supervivencia, sobre todo en situaciones de riesgo en las que interesa un aprendizaje muy rápido. La función de la memoria a largo plazo se centra en asegurar que los organismos almacenen recuerdos retrospectivos, prospectivos y emocionales durante un plazo de tiempo muy superior, incluso para toda la vida. Ambos tipos de memoria se diferencian bien tanto estructural como funcionalmente, pero las dos son complementarias y necesarias.

APRENDER ANTES DE NACER

El aprendizaje en los cefalópodos no se restringe a las etapas juvenil y adulta. También se ha observado en la fase embrionaria. *Sepia officinalis* realiza la puesta en racimos sobre distintos sustratos, como algas, corales, conchas y otros objetos del fondo. La cápsula ovígera consiste en un corion y una envoltura generalmente negra enrollada en espiral que protege al embrión. El color negro procede de su propia tinta. Durante muchos años se pensó que los embriones pasaban inadvertidos a los depredadores gracias a la opacidad de sus envolturas, pero hoy se sabe que algunos peces se alimentan de ellos.

Como los de todos los cefalópodos, los huevos de sepia acumulan mucho vitelo y el embrión se desarrolla usando esta reserva nutritiva. Durante el desarrollo embrionario, el sistema nervioso central, los ojos y otros órganos de los sentidos maduran paulatinamente, pero están desarrollados por completo en las finales. Para entonces, las envolturas ovígeras se han vuelto translúcidas. Continúan protegiendo al embrión de infecciones y otras agresiones externas, pero se hallan a la vista de los depredadores.

Si el embrión puede ser visto desde fuera, parece lógico pensar que él mismo pueda apreciar lo que ocurre en el exterior. Ante esta posibilidad cabe preguntarse: ¿tiene capacidad de aprender el embrión? El biólogo Jacques Lemaire, en los años setenta del siglo xx, analizó las variaciones de frecuencia de las contracciones del manto en embriones de sepia. Descubrió que, en el 23.^{er} estadio de desarrollo (de los 30



EL PULPO DE COCO (*Amphioctopus marginatus*), de unos 15 centímetros de longitud, usa diversos objetos para ocultarse, como las cáscaras de los cocos o, como en este caso, la concha de moluscos bivalvos. Vive en fondos arenosos de bahías o lagunas del Pacífico occidental.

definidos por él), el embrión mostraba sensibilidad a estímulos táctiles y químicos, y que en el estadio 25.º presentaba sensibilidad visual.

Como todos los cefalópodos, las sepias carecen de metamorfosis. Los recién nacidos, con apenas 6 o 9 milímetros de longitud, son capaces de realizar comportamientos similares a los del adulto: cazan usando sus tentáculos (aunque sin la precisión del adulto), distinguen las presas adecuadas para su dieta y manifiestan patrones complejos de coloración y posturales. Desconocemos muchos aspectos de este comportamiento «innato», pero la espontaneidad y la rapidez con que se produce nada más nacer induce a suponer que se ha adquirido durante el desarrollo embrionario. No sería descabellado pensar que la madre hubiese dejado en el vitelo información bioquímica (hormonas, esteroides, etcétera) de gran utilidad para sus desatendidos hijos.



LOS EMBRIONES DE SEPIA (*Sepia officinalis*), dentro del huevo, se hallan envueltos por membranas que se vuelven translúcidas en las últimas fases. De ahí que antes de nacer puedan ver, y quizás aprender, quiénes son sus depredadores, como la cabruza (*Parablennius gattorugine*).

Sin embargo, Anne-Sophie Darmaillacq, Christelle Jozet-Alvez, Cécile Bellanger y Dickel, de la Universidad de Caen, descubrieron la existencia de un aprendizaje visual prenatal en la sepia. Demostraron que, de forma espontánea, los recién nacidos preferían camarones frente a cualquier otra comida. Pero si los huevos de sepia maduraban junto a cangrejos, cuando los recién nacidos empezaban a cazar, preferían los cangrejos a los camarones. También se obtuvo el mismo resultado cuando, en vez de vídeos de camarones, en el acuario se proyectaban vídeos de cangrejos, lo que descartaba la influencia de los olores. Se confirmó así que eran los estímulos visuales los que permitían memorizar las futuras presas. Estos resultados mostraron, por primera vez, la existencia de aprendizaje visual embrionario en los invertebrados. Tales habilidades cognitivas parecen conferir importantes ventajas adaptativas en el procesamiento y la adquisición de información sobre los alimentos disponibles después de la eclosión, y se da también en tortugas y aves.

Otro rasgo que se ha observado en los embriones de cefalópodos es la lateralidad motora y perceptiva, esto es, el empleo con preferencia de uno de los dos lados a la hora de percibir el entorno y de actuar. Si bien cada vez resulta más claro que los invertebrados la presentan, hasta hace poco se conocían escasos ejemplos de ella en los cefalópodos. Los experimentos de confinamiento realizados por Christelle Jozet-Alves y Darmaillacq, de la Universidad de Caen, con la sepia europea (*Sepia officinalis*) han revelado que su comportamiento lateralizado izquierdo se halla establecido desde el momento de la eclosión, aunque puede generarse una dominancia del lado derecho mediante aprendizaje asociativo.

En sus experimentos, las investigadoras exponían embriones de sepia a tres estímulos químicos, a saber, olor de lubina (depredador de la sepia), de erizo de mar (no depredador) y ningún olor (agua de mar). A continuación, colocaban a los recién nacidos de cada grupo en un acuario con un dispositivo en forma de T. Observaban que los familiarizados con el olor del depredador giraban preferentemente hacia la izquierda, mientras que los individuos de los otros dos grupos no mostraban preferencia alguna. Las investigadoras concluyeron que la lateralidad podría proporcionar beneficios a las sepias recién nacidas en lugares donde la tasa de depredación fuese elevada. La ontogénesis de la lateralización parece, por tanto, depender de la interacción entre genes y experiencia.

En este sentido, la reciente secuenciación del ADN del pulpo californiano *Octopus bimaculoides*, realizada por Caroline B. Albertin, de la Universidad de Chicago, y sus colaboradores en 2015, ha deparado novedades inesperadas. En concreto, que los transposones (fragmentos de ADN móviles) están altamente expresados en los tejidos nerviosos, lo que sugiere que estos elementos genéticos desempeñan un papel importante en la memoria y el aprendizaje, como también se ha demostrado en insectos y mamíferos.

UN REPERTORIO INCREÍBLE DE COLORES, TEXTURAS Y FORMAS

Entre los cefalópodos se hallan los animales con mayor y más dinámica capacidad expresiva y mimética, debido a su increíble aptitud para cambiar en pocos segundos el color y la textura de la piel, así como la forma y la postura corporales.

El paradigma de este ingenio es el pulpo imitador *Thaumoctopus mimicus*. Los conocimientos sobre su extraordinaria versatilidad imitadora se deben fundamentalmente a las observaciones de Mark Norman, de la Universidad de Melbourne, realizadas en fondos arenosos de entre 2 y 12 metros de profundidad de los mares tropicales del sudeste de Asia, un ambiente de una elevada biodiversidad. *T. mimicus* es capaz de imitar la apariencia y los movimientos de más de quince especies de su hábitat, como medusas, esponjas, anémonas (*Megalactis* spp.), el camarón mantis (*Odontodactylus scyllarus*), el pez león (*Pterois* sp.), la platija de bandas (*Zebrias* sp.) y la venenosa serpiente marina rayada (*Laticauda* sp.).

Cuando los depredadores se acercan al pulpo imitador, este toma a menudo la apariencia del animal que mayor peligro represente para su depredador. Por ejemplo, cuando es atacado por peces damisela (*Amphiprion* spp.) adquiere la forma e imita el movimiento de una serpiente marina rayada, que es depredadora del pez damisela. El pulpo, que no es ponzoñoso, emula a esta venenosa serpiente adoptando una coloración en bandas negras y amarillas, al tiempo que oculta seis de sus largas extremidades en un hoyo y agita sus otras dos en direcciones opuestas. Esa estrategia de engaño para alejar a

JOSÉ LUIS GONZÁLEZ



LA MAYORÍA de los cefalópodos son eficaces depredadores y pueden capturar presas tan grandes o más que ellos. Esta sepia ha cazado un pez (probablemente un sargo) que ingerirá después de trocearlo con su pico de loro y la rádula.

los depredadores se conoce como aposematismo, y el pulpo la despliega en pocos segundos gracias a la gran flexibilidad de su cuerpo y la larga longitud de sus brazos. El animal también puede simular estar muerto, lo que logra permaneciendo totalmente inmóvil y adoptando una coloración gris clara de la piel que le proporciona la apariencia de una masa sólida estática, semejante a una anémona o a una esponja.

¿JUEGAN LOS CEFALÓPODOS?

Además de los comportamientos descritos, los cefalópodos pueden mostrar conductas peculiares sin una función aparente. A finales de los ochenta, Jenifer Mather, de la Universidad de Lethbridge en Alberta, y Ronald Anderson, del Acuario de Seattle, respectivamente, observaron que los pulpos gigantes (*Enteroctopus dofleinii*) del acuario lanzaban repetidamente chorros de agua para manipular objetos, pero no para alimentarse o para alejar de ellos sustancias molestas. Concluyeron que los pulpos «jugaban».

Gordon Burghardt, de la Universidad de Tennessee, estableció cinco criterios para describir el comportamiento de juego en el pulpo: carece de función en el contexto en el que se expresa; es espontáneo; se produce sin recibir recompensa o castigo; difiere de lo normal (por ejemplo, es muy exagerado); se repite pero no es estereotipado y lo presentan animales sanos y que no sufren estrés.

Considerando esos criterios, Michi Kuba y sus colaboradores, de la Universidad Hebrea de Jerusalén, realizaron una serie de experimentos con 21 pulpos comunes mantenidos en tanques. En los estudios, recogidos en el libro *Cephalopod cognition*, mostraron a los animales varios objetos, unos aptos para la alimentación y otros no. Definieron varios niveles de interacción con ellos, en función de si se los llevaban a la boca, los palpaban con sus ventosas sin llevárselos a la boca, los desplazaban en diferentes sentidos o se los pasaban de un brazo a otro. Los investigadores observaron que, después de un período de aclimatación, 11 de los 21 pulpos mostraron acciones que reflejaban un comportamiento lúdico.

¿Por qué manifiestan los pulpos ese tipo de conductas? Hay algunas hipótesis al respecto. Podrían ser útiles para el individuo si conllevaran una mejora de la supervivencia o de la eficacia reproductora. Jugar podría relajar un cerebro complejo y quizás estresado en condiciones de confinamiento o en estado libre en la naturaleza, donde vivir está lleno de tensiones. Otra de las hipótesis es que el juego podría mantener al cerebro ocupado en momentos en que no hay estímulos externos porque la presión ecológica se ha reducido. En cualquier caso, parece claro que este tipo de comportamientos es sintomático de una buena salud de los animales, como ocurre con numerosas especies de vertebrados.

Lo expuesto hasta ahora demuestra que los pulpos han de tomar decisiones complejas y variadas en su vida cotidiana que pueden catalogarse como capacidad cognoscitiva. Por otra parte, la experiencia de numerosos investigadores, y las mías propias, es que en un grupo de sepias o pulpos aparecen conductas individuales que permiten distinguir un ejemplar de otro. Estas características han llevado a algunos etólogos a usar el término *personalidad*. Sin embargo, para evitar ambigüedades e imprecisiones, prefiero utilizar el término *personeidad*, tal y como lo definió el filósofo Xavier Zubiri en su libro *Sobre el hombre*: «El constitutivo genético de todo viviente, en el cual, además de las notas fisicoquímicas, están ya presentes todas las notas psíquicas, como la capacidad de sentir y la cognoscitiva».

Los cefalópodos, a pesar de ser moluscos como las almejas y los caracoles, poseen un sistema nervioso desarrollado y comportamientos complejos y flexibles muy diferentes a los de sus parientes. Se desarrollaron en una línea evolutiva independiente y divergente de la que emergieron los cordados primitivos, y, posteriormente, los vertebrados, a algunos de cuyos miembros igualan, o incluso superan, en capacidad e ingenio. Comprender mejor el sistema nervioso, las conductas y el origen de la inteligencia de los cefalópodos constituyen retos muy estimulantes. Los recientes hallazgos están abriendo puertas prometedoras para el desarrollo de la etología, la neurociencia y las técnicas biomiméticas. IyC

PARA SABER MÁS

Dynamic mimicry in an Indo-Malayan octopus. M. D. Norman, J. Finn y T. Tregenza en *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 268, págs. 1755-1758, septiembre de 2001.
The brains and lives of cephalopods. M. Nixon y J. Z. Young, Oxford University Press, 2003.
Cephalopod cognition. A. S. Darmaillacq, L. Dickel y J. Mather, (eds.), Cambridge University Press, 2014.
Cephalopod behaviour. R. T. Hanlon y J. B. Messenger, Cambridge University Press, 2018.
Grow smart and die young: Why did cephalopods evolve intelligence? Piero Amodio et al. en *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 34, n.º 1, págs. 45-56, enero de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Una ventosa sensacional. Frank W. Grasso en *IyC*, diciembre de 2010.
¿Por qué a los pulpos les gusta jugar? Joachim Marschall en *MyC* n.º 46, 2011.
Maestros del disfraz. Peter Forbes en *IyC*, julio de 2011.
La consciencia de los insectos. Massimo Sandal en *MyC* n.º 95, 2019.



por Marc Domènech y Miquel A. Arnedo

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

Arañas ibéricas

A pesar de la relevancia ecológica de este grupo, todavía conocemos poco sobre la variedad de especies que existen en la península

Las arañas constituyen uno de los grupos de animales con más especies. Organismos muy abundantes y ubicuos, en los ecosistemas terrestres desempeñan un papel fundamental, al ser las principales depredadoras de los artrópodos y otros invertebrados. Pero, a pesar de su importancia, conocemos poco su diversidad.

Los recientes avances metodológicos han permitido mejorar el estudio de grupos muy diversos. Destacan los protocolos de bioinventariado rápido y la técnica de códigos de barras de ADN (*DNA barcoding*). Los primeros son métodos de muestreo estandarizados y optimizados para capturar la mayor diversidad posible de un lugar con el mínimo de tiempo y recursos. La segunda identifica especímenes a partir de la comparación de su secuencia de ADN con una biblioteca de secuencias de referencia. Esta técnica facilita la identificación, en especial cuando solo se dispone de ejemplares inmaduros, que difícilmente pueden clasificarse con los métodos tradicionales, basados en los rasgos morfológicos de los adultos.

El proyecto Ibercoding, liderado por nuestro equipo, ha combinado las dos estrategias para describir la diversidad de las comunidades de arañas ibéricas y los factores que la modelan. El estudio se ha centrado en bosques de diferentes especies de robles de seis parques nacionales: Aigüestortes y Estany de Sant Maurici, Ordesa y Monte Perdido, Picos de Europa, Monfragüe, Cabañeros y Sierra Nevada.

En los muestreos, realizados en 2013 y 2014, recogimos un total de 20.539 arañas pertenecientes a 376 especies de 39 familias. Siete de las especies se han hallado por primera vez en la península, y dos en España. Además, descubrimos 13 especies nuevas que están pendientes de ser descritas formalmente.

Nuestro estudio ha revelado que los bosques de quejigo (*Quercus faginea*) son los que presentan una mayor diversidad de arañas, siendo máxima en los Picos de Europa, con 102 especies en una sola hectárea. Los parques del norte peninsular están dominados por especies de distribución paleártica, mientras que en los del sur abundan las mediterráneas o exclusivamente ibéricas.

Nuestros resultados indican que las diferencias en las comunidades de arañas entre los parques estudiados son superiores a las que se dan entre los tipos de robledales dentro de un mismo parque. Por lo tanto, la mejor estrategia para mantener una alta diversidad de arañas consistiría en ampliar al máximo la distribución geográfica de las áreas protegidas y abarcar un gran número de hábitats (y comunidades vegetales), en lugar de centrarse en uno solo.

—Marc Domènech y Miquel A. Arnedo
Departamento de Biología Evolutiva, Ecología y Ciencias Ambientales
Instituto de Investigación de la Biodiversidad
Universidad de Barcelona



MIQUEL A. ARNEDO

SEGESTRIA FLORENTINA, de hábitos nocturnos, construye telas tubulares sensitivas con las que detecta las presas. Ampliamente distribuida en Europa, solo se encontró en Cabañeros.



LA ARAÑA NAPOLEÓN (*Synema globosum*), cuyo dibujo en el abdomen evoca la silueta del emperador, aguarda inmóvil en las flores para cazar polinizadores. Hallada en los parques de Ordesa y de Cabañeros, es de distribución paleártica.

LA ARAÑA LINCE (*Oxyopes lineatus*) no construye tela y caza pequeños insectos que acecha entre la vegetación baja. Presente en los parques de Cabañeros y Ordesa, es diurna y de distribución paleártica.

MANGORA ACALYPHA construye telas orbiculares con las que intercepta insectos voladores. De distribución paleártica, se ha identificado en todos los parques excepto en Aigüestortes.

LA ARAÑA LOBO (*Alopecosa albofasciata*) busca y caza activamente a sus presas a ras del suelo. Distribuida por buena parte del Mediterráneo y Asia central, fue encontrada en Ordesa, Sierra Nevada y Cabañeros.

por Anna Estany

Anna Estany es catedrática de filosofía de la ciencia en la Universidad Autónoma de Barcelona.



En la senda de Jesús Mosterín

Un modelo de racionalidad práctica para las ciencias del diseño

Jesús Mosterín fue un filósofo en el más amplio sentido de la palabra. Dedicó su vida a la búsqueda de explicaciones racionales para los fenómenos que acaecen en nuestro mundo natural y social. La amplitud de su obra deja constancia de ello. No es fácil, por tanto, catalogarlo en alguna rama de la filosofía.

A lo largo de su carrera, Mosterín abordó muchos de los grandes temas filosóficos. Escribió manuales de lógica y de teoría de conjuntos con los que estudiamos varias generaciones de filósofos. Nos dejó también una originalísima introducción a la lógica presentada a través de las biografías de los creadores de esta ciencia. Asumió, asimismo, el ingente proyecto de escribir una historia de la filosofía con una mirada muy amplia, que incluye tanto el pensamiento occidental como el pensamiento oriental y arcaico. Su amplio abanico de intereses le llevó a pensar con profundidad, de modo brillante, divulgativo y original sobre la naturaleza, la cultura y la racionalidad humanas. Por otra parte, el nombre de Mosterín va asociado indiscutiblemente a la defensa ética de los animales, objetivo al que dedicó varios libros.

Viniendo ya al terreno de la filosofía de la ciencia, su artículo «La estructura de los conceptos científicos», publicado en Investigación y Ciencia en enero de 1978, se convirtió en un clásico y dio base a *Conceptos y teorías en la ciencia* (2016), uno de sus libros más reeditados. Dentro de la filosofía general de la ciencia también hay que destacar sus libros *Ciencia viva* (2001) y el monumental *Diccionario de lógica y filosofía de la ciencia* (2010), escrito junto con el filósofo chileno Roberto Torretti. Asimismo, fueron muy reconocidas internacionalmente sus aportaciones a la filosofía de las ciencias especiales, sobre todo en lo relativo a la biología, la física y la cosmología.

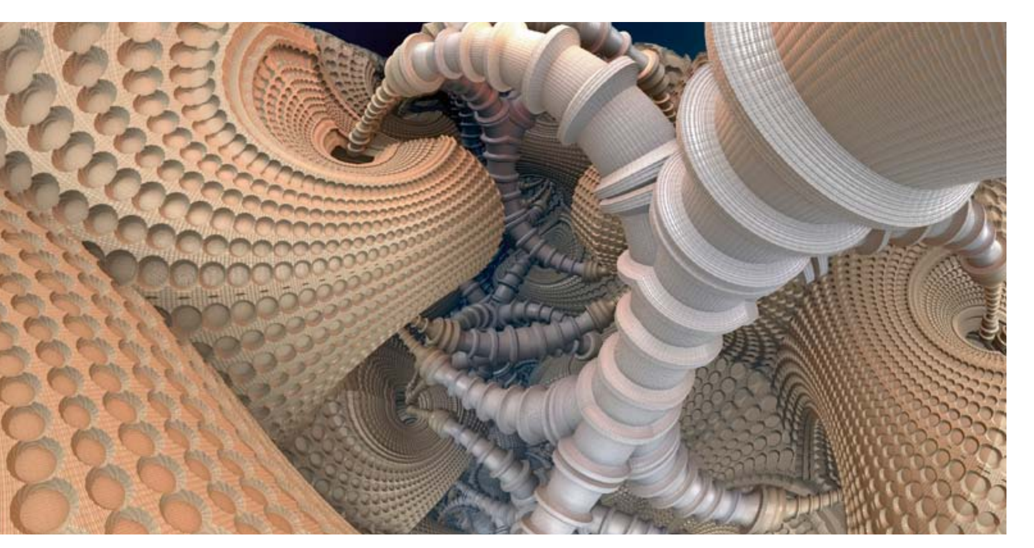
A pesar de la amplitud de intereses de Mosterín, hallamos en todo su legado un hilo conductor: el afán de racionalidad. Todas sus reflexiones iban enmarcadas en una aproximación racional a los problemas que analizaba, como muestra en su obra *Ciencia, filosofía y racionalidad* (2013). Nos dio un ejemplo de cómo filosofar con criterios racionales sobre todo lo que nos rodea.

Como discípula suya desde los años de estudiante de filosofía en la Universidad de Barcelona, mis intereses en el marco de la filosofía de la ciencia se los debo, en buena parte, a Mosterín. Sobre todo en la forma de abordar los temas y también en el interés por la ciencia y en la curiosidad por todo lo que ocurre en el mundo. Esta era, quizás, una de las mayores virtudes intelectuales de Mosterín, su capacidad para abrir temas, para sugerir nuevas y originales sendas de investigación que otros hemos podido seguir después con libertad. Y quizás, en este espíritu, el mejor homenaje que podemos hacerle es precisamente prolongar de modo crítico y creativo sus ideas, y con ello dar más vida y continuidad a lo que fueron sus enseñanzas y proyectos.

Mosterín trató de poner las prácticas científicas bajo la lupa del análisis racional, en especial en lo que se refiere a las ciencias más tradicionales y básicas, como la lógica, las matemáticas, la física y la biología. Como prolongación de este programa, hoy día también habría que pensar en la parte más aplicada de las ciencias o, dicho de otro modo, en las llamadas ciencias del diseño.

En lo que sigue esbozaré una propuesta para analizar las ciencias del diseño desde los presupuestos de la racionalidad práctica. Veremos cómo, a la larga, las propias ciencias del diseño acaban por proporcionarnos interesantes modelos de racionalidad, hasta tal punto que podríamos hablar de una nueva epistemología inspirada en el diseñar.

La filosofía siempre ha buscado los fundamentos racionales de nuestras creencias. Ha intentado sobreponerse a las tendencias escépticas y relativistas que procuran socavar dichos fundamentos. En especial, la filosofía de la ciencia, desde el primer tercio del siglo xx, con el Círculo de Viena, construyó un marco epistemológico y metodológico para la investigación científica. Sin embargo, sus modelos iban dirigidos principalmente a la ciencia pura o básica. Se trata, ahora,



de buscar un marco racionalista con el que abordar el saber práctico. Para ello, vamos a ver cómo el diseño ha ido penetrando en diversos ámbitos académicos, analizaremos las cuestiones epistemológicas propias del diseño y, finalmente, veremos en qué términos se puede configurar una propuesta racionalista, inmersa en la cultura del diseño, que dé respuesta a las circunstancias en las que la ciencia se desarrolla actualmente.

Podemos hablar de diseño cuando se da una intervención humana, guiada por ciertos objetivos funcionales, sobre el medio natural o social. Hay diseño en buena parte de las ingenierías y, por supuesto, en la arquitectura y el urbanismo. Pero también comienza a haberlo en las ciencias de la vida (pensemos en la biología sintética y las bioingenierías) y en ciencias tradicionalmente consideradas sociales (economía, biblioteconomía y documentación, comunicación, didáctica, derecho). En todos estos ámbitos se busca el conocimiento para la acción, para la aplicación, para la modificación de las realidades naturales y sociales al servicio de objetivos humanos.

La expresión «ciencias del diseño» comparte campo semántico con otras muy próximas como «tecnología», «ciencia de lo artificial» o «ciencia aplicada». De hecho, resultan seminales en este campo la obra de Herbert Simon *The Science of the artificial* (1969) y el artículo de Ilkka Niiniluoto «The aim and structure of applied research» (1993). Aunque el significado de todos estos términos no es estrictamente coincidente, no podemos entrar ahora en los matices diferenciales. Lo que nos interesa destacar aquí es que la filosofía de la ciencia se había ocupado muy poco de estos campos. Sin embargo, hoy día, están tan presentes en nuestra vida que es imposible obviarlos. Niiniluoto considera que los filósofos de la ciencia han abordado las ciencias aplicadas con los mismos modelos de las ciencias puras, lo cual, según él, es un error. Propone, en cambio, tomar las ciencias del diseño como modelos para la investigación aplicada.

Se puede alegar que el diseño procede originalmente de las prácticas profesionales, más que de la investigación. Incluso cuando se ha introducido en el mundo académico, ha estado muy ligado al arte y aplicado a nuestra vida cotidiana. Es cierto. Pero actualmente muchas prácticas de diseño son fruto de la investigación tecnocientífica, se llevan a cabo con un alto grado de cientificidad, con sistematicidad metodológica, planificación e incluso evaluación y control de riesgos e impactos. El diseño, en estos casos, se ha convertido en auténtica ciencia y merece ser objeto de consideración filosófica: ¿se trata de una actividad racional? ¿A qué modelos de racionalidad se ajustan las ciencias del diseño?

La idea de diseño ha llegado incluso a la epistemología. También ha contribuido a ello el hecho de que la propia epistemología haya pasado de una perspectiva apriorística a una naturalizada; es decir, ya no hace caso omiso de los resultados empíricos de la ciencia a la hora de configurar sus modelos metodológicos. Este movimiento acerca la reflexión epistemológica a las prácticas de diseño.

Como resultado, contamos ya con varias propuestas filosóficas que pueden contribuir al desarrollo de una epistemología racionalista de las ciencias del diseño. Así, el arquitecto argentino Guillermo Bengoa, en su artículo «Distintos acercamientos epistemológicos: cinco enfoques sobre los objetos» hace una distinción entre epistemología «para» el diseño y epistemología «del» diseño. Sobre la primera, dice que tiene que ver con «una ciencia del conocimiento que ayude al diseñador». La segunda la identifica con «una epistemología que utilice el propio diseño como herramienta para conocer la realidad», es decir, con una epistemología que tenga en cuenta las formas de pensar propias del diseñador.

Por su parte, el profesor de innovación de la Universidad de Texas Darius Mahdjoubi presenta, en su *Epistemology of design* (2003), una clasificación tripartita del diseño. Distingue el diseño como actividad, como planificación y como epistemología. La actividad se refiere a la fase inicial, en la que se piensa cómo será el producto. La planificación alude a la organización de las acciones para la realización del producto. Y la epistemología atañe a la relación con las metodologías sintéticas necesarias para realizar cualquier cambio en las ciencias aplicadas. Estas difieren de las metodologías analíticas tradicionales, más centradas en la justificación de las teorías científicas.

En esta línea, la epistemología del diseño nos obliga a repensar la propia idea de epistemología. Así, bajo el título de *Design epistemology* (2012), Dino Karabeg, informático de la Universidad de Oslo, cuestiona la epistemología tradicional, centrada en valores como verdad y significado, para proponer una epistemología en la cual sea la innovación el eje central. Y, en el extremo de la serie, el experto en diseño Nigel Cross en su obra *Designerly ways of knowing* (2006) llega a considerar el diseño como una forma de conocimiento (*design epistemology*) y un modo específico de pensamiento (*design thinking*). El diseño constituye, para él, la tercera cultura que se añadiría a la de las ciencias y las humanidades. Debería formar parte de la educación, y no sólo para determinadas profesiones, sino como uno de los pilares de la formación general. Así como hay formas humanísticas y científicas de acercarse a los fenómenos, también podemos abordarlos desde formas de pensar «diseñísticas».

Cross señala algunas diferencias entre estas tres culturas respecto al objeto de estudio, el método y los valores. En el caso del diseño, el objeto de estudio es el mundo artificial, entre los métodos cita la formación de patrones y los valores predominantes serían la practicidad, la empatía y la adecuación a propósitos. El modo «diseñístico» de pensar implica incluso diferentes habilidades, como las de resolver problemas mal definidos, adoptar estrategias centradas en la búsqueda de soluciones, utilizar el razonamiento abductivo, así como los medios no verbales, gráficos e icónicos para representar el conocimiento.

En suma, si Jesús Mosterín nos enseñó a buscar modelos de racionalidad aplicables a la praxis humana, las epistemologías del diseño nos llevan un paso más allá, hasta la consideración de las prácticas de diseño como inspiradoras de nuevos modelos de racionalidad. IyC

PARA SABER MÁS

Ciencia viva. Jesús Mosterín. Espasa, 2001.
Las ciencias de lo artificial. Herbert A. Simon. Editorial Comares, 2006.
Designerly ways of knowing. Nigel Cross. Springer, 2006.
Las ciencias de diseño. Dirigido por Wenceslao J. González. Netbiblo, 2007.
Ciencia, filosofía y racionalidad. Jesús Mosterín. Gedisa, 2013.
Innovación en el saber teórico y práctico. Anna Estany y Rosa M. Herrera. College Publications, 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

La estructura de los conceptos científicos. Jesús Mosterín en *IyC*, enero de 1978.

por Michael Shermer

Michael Shermer es editor de la revista Skeptic (www.skeptic.com) y miembro honorario del claustro de la Universidad Chapman.



¿El horóscopo en mi genoma?

La capacidad predictiva de los análisis genéticos personales es todavía limitada

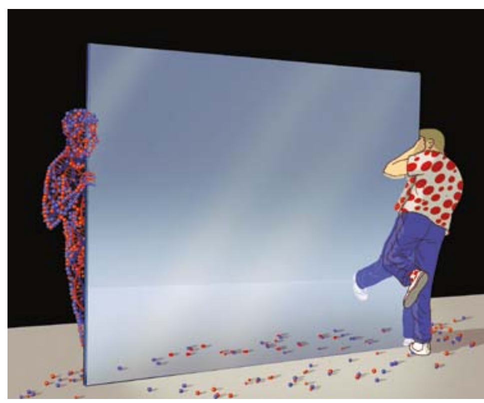
Al igual que muchos otros nacidos en el *baby boom*, me inclino a leer los obituarios de los periódicos y cotejo edades y causas probables de muerte con mis parámetros de salud actuales, especialmente los relacionados con enfermedades cardíacas (de las que fallecieron mi padre y mi abuelo) y el cáncer (del que murió mi madre). Y luego está el alzhéimer, que, según un informe de 2015, destruirá el cerebro de más de 28 millones de los nacidos en el *baby boom*. Dada la importancia que tienen para la longevidad los antecedentes familiares y la genética, pagué 199 dólares a la empresa 23andMe para que analizara mi genoma y me ofreciera datos sobre mis ancestros y mi salud. Escupí en un pequeño vial de plástico, seleccioné todas las pruebas disponibles en el formulario en el que se listaban las variantes génicas relacionadas con enfermedades y esperé ansiosamente los resultados. ¿Qué tal lo harían?

En primer lugar, acertaron bastante bien el origen de mi linaje: europeo en un 99,7 por ciento, principalmente francés/alemán (29,9 por ciento), británico/irlandés (21,6 por ciento), balcánico/griego (16,4 por ciento) y escandinavo/sueco (5,5 por ciento). Mi abuela materna es alemana y mi abuelo materno es griego; mis bisabuelos paternos eran de Suecia y Dinamarca.

También adivinaron algunos de mis rasgos: que si como espárragos, lo huelo en mi orina; que percibo más el sabor amargo; que mis ojos son de color avellana; que mis dedos anulares son más largos que mis índices; que tengo pocas pecas, y que mi pelo es lacio y claro.

Y, por último, se me informaba sobre las enfermedades. Se me iluminaron los ojos al leer «No se han detectado variantes genéticas» relacionadas con el párkinson, la fibrosis quística, la anemia de células falciformes, la enfermedad de Tay-Sachs y, lo que más me preocupaba, el alzhéimer. «¡Qué alegría, qué éxtasis imprevisto!»

Pero, un momento. También indicaba que no tengo calvicie ni pico de viuda; que tengo hoyuelos en las mejillas y poco pelo en la parte superior de la espalda; y que soy ligeramente cejijunto y mis dedos gordos de los pies son más largos, todo lo cual es falso. Si una prueba genética se equivoca en unos rasgos físicos relativamente simples, ¿qué podemos esperar de su precisión sobre enfermedades más complejas? 23andMe advierte: «Nuestros informes no incluyen todas las variantes genéticas que podrían intervenir en esas enfermedades. También pueden influir otros factores, como el estilo de vida, el ambiente y los antecedentes familiares».



Por ejemplo, respecto a los dedos de los pies, el 56 por ciento de las personas cuyos resultados coinciden con los míos tienen un dedo gordo más largo. Pero yo formo parte del 44 por ciento restante. Una predicción que apenas supera el 50 por ciento no es ninguna maravilla. En cuanto al alzhéimer, ser portador de la variante e4 del gen *APOE* aumenta el riesgo de padecer la enfermedad en un 1 por ciento a los 65 años, entre un 4 y un 7 por ciento a los 75 años, y entre un 20 y un 23 por ciento a los 85 años en hombres (menos de 1, entre 5 y 7 y entre 27 y 30 por ciento, respectivamente, en las mujeres). Poseer dos copias del gen (una de cada progenitor) eleva la cifra hasta el 4 por ciento (a los 65 años), 28 por ciento (a los 75 años) y 51 por ciento (a los 85 años) en hombres (2, 28 y 60 por ciento en las mujeres). Pero la prueba «no incluye todas las variantes genéticas posibles asociadas con la aparición tardía de la enfermedad», por lo que, aunque me falten ambas variantes e4, el riesgo de sufrirla a los 75 años todavía se sitúa entre un 1 y un 2 por ciento; y a los 85 años, entre un 5 y un 8 por ciento.

Para entender mejor esta maraña de datos, contacté con Rudy Tanzi, neurólogo de la Escuela de Medicina de Harvard y jefe del Proyecto sobre el Genoma del Alzhéimer, codescubridor de muchos de los genes relacionados con dicha enfermedad. Admitió que nadie puede asegurar si un determinado cálculo de la varianza del alzhéimer se debe a la genética o al estilo de vida, y añadió que la variante e4 «está presente en el 20 por ciento de la población y en el 50 por ciento de los que sufren tardíamente la enfermedad, pero ello no significa que uno vaya a padecerla».

Además, «hasta que no identifiquemos todas (o la mayoría de) las mutaciones que realmente causan la enfermedad en esos 40 genes, cualquier intento de asociar una cifra concreta a la varianza genética resulta en vano. Mientras tanto, todo lo que podemos asegurar es que solo un 5 por ciento de esas mutaciones provocan alzhéimer. Ello significa que en la mayoría de los casos restantes, si no en todos, es una interacción entre genes y ambiente o estilo de vida lo que determina el riesgo».

¿Qué podemos hacer para protegernos contra el alzhéimer? Tanzi propone unos consejos básicos: dormir entre siete y ocho horas, reducir el estrés, ser sociables, hacer ejercicio físico (cardiovascular), aprender y seguir una dieta sana, con mucha fruta, verduras, aceite de oliva y cereales integrales.

En cuanto a los servicios de análisis personal del genoma, los resultados que permitirían una intervención preventiva son todavía limitados.

IZHAR COHEN

FÍSICA CUÁNTICA

¿ES EL UNIVERSO UN



EN SÍNTESIS

Gerard 't Hooft ha destacado por sus investigaciones en física de partículas y gravedad cuántica. Varios de los resultados obtenidos a lo largo de su carrera son considerados hoy pilares de la física matemática.

En 1999 recibió el premio Nobel de física por sus investigaciones en teoría cuántica de campos. El físico demostró la coherencia interna de la clase de teorías empleadas para describir las interacciones entre partículas elementales.

En los últimos años ha dirigido su trabajo hacia los fundamentos de la mecánica cuántica. En esta entrevista esboza sus ideas para derivar esta teoría fundamental a partir de un modelo clásico y determinista.

AUTÓMATA CELULAR?

El premio nóbel de física Gerard ’t Hooft explica en esta entrevista una propuesta para derivar la mecánica cuántica a partir de leyes completamente deterministas

Manon Bischoff

Gerard ’t Hooft nació en 1946 en Den Helder, una pequeña ciudad de los Países Bajos. Estudió en la Universidad de Utrecht, donde se doctoró en 1972. Durante su tesis doctoral demostró un profundo resultado sobre la estructura matemática de las teorías de campos usadas en el modelo estándar de la física de partículas. Junto a quien fuera su director de tesis, el también neerlandés Martinus Veltman, aquel trabajo de juventud le valdría el premio Nobel de física en 1999. Reconocido también por sus investigaciones en cromodinámica cuántica y física de agujeros negros, en los últimos años ’t Hooft ha centrado sus intereses en desarrollar un modelo determinista capaz de reproducir las predicciones de la mecánica cuántica. En esta entrevista habla sobre las perspectivas de dicho modelo y sobre la evolución que ha seguido la física teórica durante las últimas décadas.

Profesor ’t Hooft, en agosto de 1980 publicó usted un artículo en esta revista sobre el modelo estándar de la física de partículas. En él intentaba explicar el mundo subatómico a partir de los conocimientos de los que se disponía en aquellos años. ¿Cómo han evolucionado desde entonces esos conceptos teóricos?

En aquella época el modelo estándar era el modelo matemático más simple que daba cuenta de los datos experimentales. No pensábamos que fuera a mantenerse vigente durante tantos años. Más bien al contrario, esperábamos que, con el tiempo, fuera necesario introducir algunas modificaciones.

No hay duda de que, gracias a los experimentos realizados desde entonces, hemos logrado grandes descubrimientos, como el bosón de Higgs, detectado en 2012 en el CERN. Pero los conceptos teóricos se han mantenido prácticamente intactos durante casi cuarenta años. Algunos investigadores esperaban que el hallazgo de nuevos tipos de partículas nos diera pistas sobre una teoría más fundamental. Sin embargo, hasta ahora tales partículas no han aparecido.

Es por tanto una buena noticia que el modelo estándar sea tan resistente.

Sí y no. Aunque el modelo estándar describe muy bien las partículas subatómicas, presenta también enigmas. Por ejemplo, no entendemos las constantes fundamentales de la naturaleza. ¿Por qué tiene el electrón la masa que tiene y no otra?

Aunque podemos medir con gran precisión la mayoría de las constantes de la naturaleza, ignoramos su origen. Todos los intentos de explicar su valor exacto han fracasado. La única salvedad es el llamado principio antrópico, que afirma que los valores de las constantes fundamentales son los que vemos ya que, de otra manera, no podríamos existir. Pero este tipo de argumentación no satisface a la mayoría de los científicos.

Todavía no es posible comprobar experimentalmente ninguna teoría que unifique las cuatro interacciones fundamentales. Sin embargo, muchos defienden que tal teoría unificada debería ser simple y elegante; es decir, «natural». En ella no habría lugar para un valor arbitrario de las constantes de la naturaleza. Usted introdujo el concepto de naturalidad hace ya cuarenta años. ¿Sigue pensando que ofrece el camino correcto para entender las leyes de la naturaleza, o necesitamos ideas radicalmente nuevas?

Hoy la noción de naturalidad está siendo muy cuestionada. La «natural» teoría de cuerdas predice nuevas partículas, pero hasta ahora los físicos del CERN no han conseguido detectarlas. No sé si la idea de naturalidad puede todavía salvarse. Es posible que necesitemos definiciones completamente nuevas.

Al hablar de una teoría unificada de las cuatro fuerzas fundamentales, en su artículo de 1980 afirmaba: «Aunque no se ha logrado tal unificación, en los últimos años se han realizado, qué duda cabe, algunos progresos». Hoy en día los físicos siguen buscando esa teoría del todo. Cuarenta años después, ¿estamos realmente más cerca de conseguirlo?

Así lo creo, aunque aún nos queda un largo camino por recorrer. Se trata de un problema en el que los desarrollos se suceden despacio. En los años transcurridos desde entonces, las ideas fundamentales han cambiado. Los investigadores en teoría de cuerdas suponen que los constituyentes fundamentales de la materia no son puntos (partículas), sino pequeños objetos unidimensionales (cuerdas). Pero, como ya he dicho, de momento esta idea no ha sido confirmada.

¿Cree todavía en la teoría de cuerdas?

Algunos teóricos de cuerdas afirman estar muy cerca de encontrar la solución. Siempre he dicho que son demasiado optimistas. Esto es algo que deberían admitir de una vez. En mi honesta opinión, la teoría de cuerdas está aún muy lejos de poder describir nuestro universo.

¿Qué opciones le parecen más prometedoras?

En estos momentos estoy estudiando los efectos cuánticos que pueden producirse en los agujeros negros. Siguiendo esta línea de investigación, hace algunos años descubrí propiedades desconocidas del espacio y el tiempo, como que la cantidad de información que puede almacenarse en el espacio es limitada y crece con la superficie [de la región considerada], no con el vo-



GERARD 'T HOOFT recibió el premio Nobel en 1999 por el trabajo realizado más de veinte años antes durante su tesis doctoral. En él demostró que las teorías usadas en el modelo estándar de la física de partículas eran «renormalizables»: un requisito necesario para dar sentido físico a los resultados formalmente infinitos que aparecen en los cálculos.

FRIEDERIKE HENTSCHEL/INSTITUTO GERMANO-AMERICANO DE HEIDELBERG/FESTIVAL INTERNACIONAL DE CIENCIA DE HEIDELBERG

lumen, como cabría esperar. Existen otros fenómenos increíbles que aún deben entenderse. Por ejemplo, que los agujeros negros parecen destruir la información. Mi conclusión es que tenemos mucho que aprender del estudio de estos objetos.

Además de sus resultados en este campo, hace dos años publicó un libro en el que presentaba una nueva perspectiva de la mecánica cuántica. ¿Por qué no le satisfacen las interpretaciones existentes?

Me desagrada que la interpretación de Copenhague, que se remonta a Bohr y Heisenberg, no explique lo que realmente ocurre en el mundo microscópico. En los experimentos medimos algo y obtenemos un resultado, pero no sabemos cómo se produce. Por ejemplo, podemos dirigir un electrón hacia una doble rendija y medir por cuál de ellas pasa, pero no sabemos por qué sucede así. En el siguiente intento, puede que otro electrón pase por la segunda rendija. ¿Qué le ocurre realmente a la partícula para que obtengamos un resultado u otro?

El problema básico radica en que no podemos predecir con total exactitud el resultado de un experimento. La mecánica cuántica solo nos permite calcular la probabilidad de un resultado. Si repetimos un experimento cien veces, podemos estimar la frecuencia con que obtendremos un determinado valor. Dicho de otra forma: podemos hacer predicciones estadísticas. Pero esto para mí no es suficiente, quiero saber qué es lo que realmente está pasando.

«Es justamente así como veo la mecánica cuántica: como un modelo que permite manejar estadísticamente un número gigantesco de grados de libertad»

Además de la de Copenhague, existen otras interpretaciones de la mecánica cuántica. ¿Qué opinión le merecen?

Existen diversas interpretaciones. A muchos físicos les molesta esa comprensión insuficiente de la realidad. Las dos interpretaciones más conocidas que tienen en cuenta la realidad son la mecánica de Bohm y la teoría de los muchos mundos. En ambas, los investigadores suponen que todos los posibles resultados de

un experimento tienen lugar; a saber, en universos paralelos. En mi opinión, este concepto es muy discutible. Creo que la ciencia aún no ha encontrado la respuesta correcta. Hasta ahora hemos sido demasiado torpes. [*Nota de los editores: La relación entre la mecánica de Bohm y los universos paralelos ha sido defendida por algunos autores; al respecto, véase el artículo de Lev Vaidman o el libro de David Deutsch citados en la bibliografía.*]

En su libro describe la mecánica cuántica en términos de «autómatas celulares». ¿De qué se trata?
Un autómata celular es un modelo computacional sencillo de un sistema que cambia con el tiempo. El autómata está formado por células de dos, tres o más dimensiones organizadas en un retículo. Los estados de las células codifican propiedades de la teoría que varían con el tiempo. Estos son los «grados de libertad», como la posición o la velocidad de una partícula. Para imitar las leyes de la naturaleza, asumo que, en cada instante de tiempo, una célula únicamente puede influir en las células adyacentes. A medida que pasa el tiempo, el sistema se va haciendo más complejo, de forma que todas las células pueden acabar interaccionando unas con otras.

¿Cómo se le ocurrió la idea de describir la mecánica cuántica en esos términos?
El punto clave de la mecánica cuántica es que no es continua. Las variables dinámicas, como la energía de una partícula, cambian a saltos, están «cuantizadas». Esta propiedad es también la que caracteriza a los estados de las células del autómata; es decir, los grados de libertad.

¿Qué ventaja tiene su descripción con respecto a otras interpretaciones de la mecánica cuántica?
Que es extremadamente eficiente. Tanto en la mecánica de Bohm como en la interpretación de los muchos mundos, los investigadores han de asumir la existencia de un número casi infinito de universos diferentes. En cambio, el modelo de autómata celular implica un solo universo; como consecuencia, es mucho más eficiente.

¿Cree que nuestro universo es un autómata celular?
En principio, sí. Ambos sistemas tienen propiedades similares. Inicialmente, los dos son muy simples: el universo es pequeño y relativamente homogéneo, y la configuración inicial del autómata celular es sencilla. Es a través de su evolución temporal como van ganando en complejidad.

Sin embargo, creo que mi teoría tan solo representa un modelo muy simplificado de la realidad. Las células del autómata pueden ordenarse en estructuras mucho más complejas que las alcanzadas en el retículo simple que utilizo.

¿De cuántas células constaría un autómata que pudiera simular el universo entero?
En principio necesitamos una célula por cada grado de libertad del universo. Y a cada grado de libertad le corresponde un bit de información. Ahora bien, las partículas existentes poseen varios grados de libertad, a lo que habría que añadir los correspondientes a las propiedades del espacio y el tiempo.

Como ya he mencionado, sabemos que el universo contiene una cantidad finita de información. Según nuestros cálculos, un metro cuadrado de espacio puede contener un máximo de 10^{69} bits. Este número es finito, aunque inimaginablemente grande: diez veces mayor que el número de átomos en la Vía Láctea. Para tratar semejante cantidad de información necesitamos métodos estadísticos. Es justamente así como veo la mecánica cuántica: como un modelo que permite manejar estadísticamente un número gigantesco de grados de libertad.

Un autómata celular es un objeto clásico y, como tal, no sigue las leyes del mundo cuántico. En los años sesenta, el físico John Bell demostró que la mecánica cuántica no puede describirse en términos clásicos. ¿Qué implica esto para su trabajo?
Numerosos científicos sostienen que ese resultado constituye un serio desafío a mi modelo. Del teorema de Bell se sigue que la mecánica cuántica no puede describirse en términos de una teoría clásica local. Eso quiere decir que la información no puede propagarse ni hacia atrás en el tiempo ni a una velocidad mayor que la de la luz.

Pero, además, el teorema supone que existen observadores con libre albedrío, que pueden decidir libremente si miden, por ejemplo, la posición o la velocidad de una partícula. Pero si el universo es un autómata celular, el propio observador es parte de él. La elección que tome estará, de hecho, predeterminada

ASÍ FUNCIONA

¿Qué es un autómata celular?

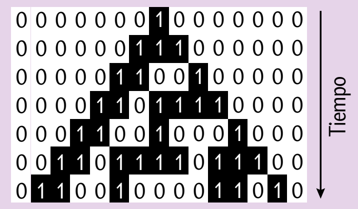
Un autómata celular consta de un retículo cuyas celdas, o células, pueden adoptar distintos estados y cuya evolución en el tiempo viene dada por una serie de reglas. Un ejemplo sencillo lo proporciona un retículo unidimensional de 15 casillas, cada una de las cuales puede encontrarse en uno de dos estados: 0 o 1. Consideremos la siguiente configuración inicial:

0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0

A partir de aquí, en cada paso de tiempo el estado de cada celda se actualiza según la siguiente regla: en cada grupo de tres casillas consecutivas, el estado asignado a la celda central cambia según el algoritmo

000	111	110	101	100	011	010	001
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
0	0	0	0	1	1	1	1

(los valores de los extremos pueden fijarse siempre en 0). Con el paso del tiempo, este autómata celular evolucionaría según el esquema:



Los autómatas celulares se han empleado para modelizar la evolución de sistemas muy diversos en computación, matemáticas, física o biología. En los últimos años, Gerard 't Hooft ha argumentado que un modelo de este tipo podría proporcionar una explicación determinista de las leyes cuánticas.

por el autómata. Por esa razón, el teorema de Bell no se aplica a mi modelo.

¿No cree, pues, en el libre albedrío?
Creo que las leyes de la naturaleza son completamente deterministas. Nada sucede sin una razón. Sin embargo, hay tantas variables implicadas que nadie podrá jamás comprenderlas, ni mucho menos controlarlas. Por tanto, a efectos prácticos, sí hay algo parecido al libre albedrío.

Al margen de esa explicación, algunos científicos afirman que su modelo no es local. ¿A qué se refieren?
El autómata celular da lugar a una cantidad increíble de conexiones entre las distintas células. Todavía no entendemos completamente la manera en que estas correlaciones se desarrollan en el tiempo. No obstante, surgen nuevos fenómenos que nos obligan a redefinir el concepto de localidad. Muchos citan las definiciones dadas por Bell —con las que no estoy completamente de acuerdo— para concluir que en mi modelo hay una transmisión de información hacia el pasado. Pero esto solo parece ocurrir así cuando no entendemos la intensa interacción entre las células. Hemos de comprender de una vez cómo evoluciona y se disemina la información en el tiempo.

¿Sigue blogs o foros en Internet para mantenerse al corriente de la opinión de otros científicos?
He discutido con algunos filósofos sobre determinismo y libre albedrío, lo que no siempre es fácil. Por lo demás, observo si otros investigadores contradicen mis ideas. De esta manera puedo defenderme y averiguar por qué razón esa persona no está convencida. En muchas ocasiones, la crítica tiene un fundamento que me interesa comprender. Algunos, sin embargo, insisten en que la mecánica cuántica es radicalmente distinta de cualquier teoría clásica. Sus blogs no me resultan de ninguna ayuda, por lo que a partir de cierto momento dejo de seguirlos.

Usted ha desarrollado una nueva interpretación de la mecánica cuántica. No obstante, las ecuaciones y las leyes básicas siguen siendo las mismas. ¿Espera que su interpretación le guíe para encontrar nueva física?
Si entendiésemos mejor la mecánica cuántica, podríamos hacer modelos más precisos para describir la naturaleza. Uno de mis objetivos consiste en comprender mejor las partículas elementales.

¿Está cerca de conseguir esa meta? ¿Puede describir el modelo estándar de la física de partículas?
No, todavía estamos lejos de eso. Mi esperanza es que en algún momento aparezca alguien joven con nuevas ideas que nos haga avanzar. Probablemente necesitemos entender mejor la gravedad para resolver el problema.

Unificar la teoría de las partículas subatómicas con la gravitación es uno de los grandes retos de la física. ¿No tendría más sentido empezar con un problema más sencillo?
No necesariamente. La gravitación es una propiedad fundamental de la naturaleza: todo está sometido a ella y nada puede escapar a su influjo; incluso curva el espaciotiempo. En un primer momento intentamos desarrollar una teoría de partículas subatómicas en ausencia de gravedad. Pero eso ha resultado ser extremadamente difícil y, tras invertir mucho, no hemos obtenido resultados significativos. Parece haber algo que estamos pasando por alto. Y así es: estamos obviando la gravedad. Es probable que hasta que no consigamos entender esta interacción no podamos formular un autómata celular apropiado.

Más allá de la física, usted fue embajador del proyecto neerlandés Mars One, que aspiraba a colonizar Marte antes de 2040. ¿Cómo empezó su interés por aquella misión?
Todo comenzó cuando conocí a un par de jóvenes entusiastas que defendían que era hora de comenzar a pensar seriamente en establecer colonias humanas en Marte. Yo estaba de acuerdo con ellos, a pesar de que sus estimaciones financieras y de plazos me parecían demasiado optimistas. El proyecto implicaría grandes costes aunque los colonos no regresaran a la Tierra. En estos momentos, creo que deberíamos pensar primero en establecer colonias en la Luna. Por eso quiero animar a la gente a trabajar en esa dirección. A pesar de que quede un gran camino por recorrer, estoy convencido de que, en un futuro lejano, colonizaremos el espacio exterior a gran escala. IyC

Manon Bischoff *es física y redactora de* Spektrum der Wissenschaft, *la edición alemana de* Scientific American.

PARA SABER MÁS

Renormalizable Lagrangians for massive Yang-Mills fields. Gerard 't Hooft en *Nuclear Physics B*, vol. 35, págs. 167-188, diciembre de 1971.
A planar diagram theory for strong interactions. Gerard 't Hooft en *Nuclear Physics B*, vol. 72, págs. 461-473, abril de 1974.
Dimensional reduction in quantum gravity. Gerard 't Hooft, octubre de 1993. Disponible en **arxiv.org/abs/gr-qc/9310026**
La estructura de la realidad. David Deutsch. Anagrama, 2006.
Quantum theory and determinism. Lev Vaidman en *Quantum Studies: Mathematics and Foundations*, vol. 1, págs. 5-38, septiembre de 2014. Disponible en **arxiv.org/abs/1405.4222**
The cellular automaton interpretation of quantum mechanics. Gerard 't Hooft. Springer International Publishing, 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

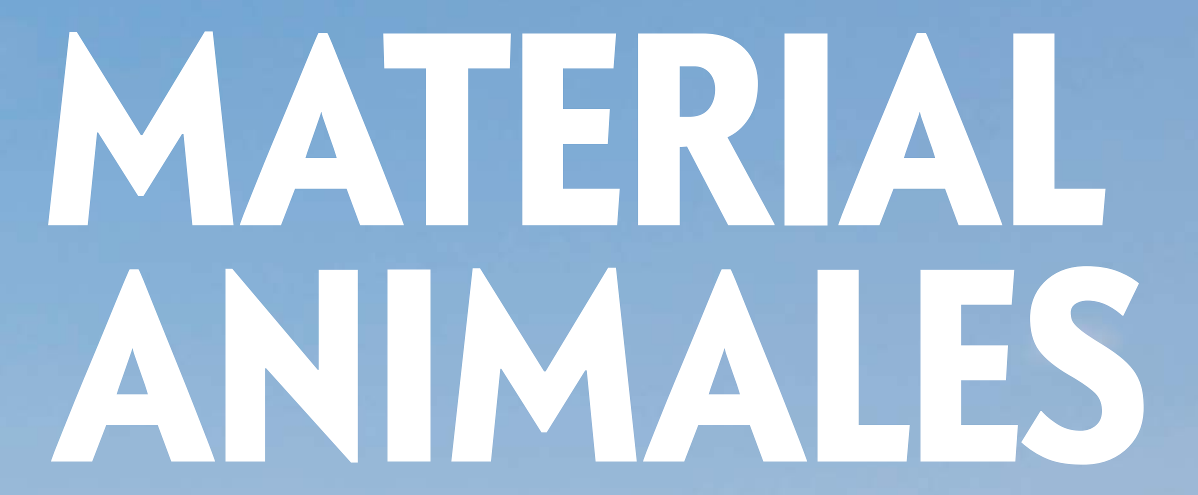
Teorías gauge de las fuerzas entre partículas elementales. Gerard 't Hooft en *IyC*, agosto de 1980. Reeditado para «Grandes ideas de la física», colección *Temas* de *IyC*, n.º 80, 2015.
El autómata celular ofrece un modelo del mundo y es un mundo por sí mismo. Brian Hayes en *IyC*, mayo de 1984.
Programación en ciencias y en matemáticas. Stephen Wolfram en *IyC*, noviembre de 1984.


ARQUEOLOGÍA

LA CULTURA EN LOS

Los restos arqueológicos de las herramientas líticas dejadas por otros primates están arrojando luz sobre el origen de la innovación tecnológica

Michael Haslam



MATERIAL ANIMALES

EN SÍNTESIS

A los arqueólogos solo les ha interesado la recuperación de la cultura material propia de los miembros de la familia humana.

Pero algunos primates, entre otros animales, usan herramientas.

En los últimos años se han comenzado a desenterrar los restos arqueológicos de esos animales.

Esas investigaciones persiguen dilucidar los factores que determinaron el nacimiento de la tecnología animal y humana.

ESTOS MACACOS CANGREJEROS abren moluscos con útiles de piedra en una playa de Tailandia.



Michael Haslam, exmiembro de la Facultad de Arqueología de la Universidad de Oxford, es hoy investigador independiente afincado en Londres. Se dedica al estudio de la evolución de la tecnología en el ser humano y en otras especies.

Que la marea estuviera subiendo deprisa no parecía preocupar a aquellos monos. Unos andaban correteando por las rocas y los mangles, alejados de la orilla, mientras otros masticaban con sosiego una ostra o disfrutaban de una sesión de espulgo. Desde una rama, los más jóvenes se zambullían en las cálidas y límpidas aguas. Como cualquier habitante de esta parte de la costa de Tailandia, vivían en sintonía con el vaivén diario del mar.

Yo, en cambio, no quitaba el ojo a la pleamar. En esa plácida mañana de diciembre de 2013, permanecía agachado junto a un pulcro hoyo cuadrado que ahondaba hasta donde me era posible, sacando paletadas de arena mojada. De apenas medio metro de lado, había tardado horas en cavarlo, desde la bajada de la marea en la noche anterior. Convenía andar con cuidado, pues un gesto en falso y mi obra se desmoronaría.

Aquella era una excavación arqueológica en toda regla, con el aspecto que uno pueda imaginar: cubos, tamices, cordeles, niveles, sacos y cintas métricas desparramados aquí y allá. Pero los objetos antiguos que me habían traído hasta aquella pequeña isla de Piak Nam Yai, en el Parque Nacional de Laem Son, no eran nada corriente. No andaba en busca de monedas ni de cerámica ni de los vestigios de un antiguo asentamiento ni de una remota civilización desaparecida. Buscaba restos de la cultura simia que desfilaba ante mí en la playa.

Soy arqueólogo de primates: empleo los métodos habituales de la arqueología para conocer el comportamiento pasado de diversas especies de primates. Con sinceridad, la imagen que me viene a la cabeza cuando pronuncio esa frase es la del Dr. Cornelius, el chimpancé de la película *El planeta de los simios*, de 1968, que descubre indicios de que los humanos no fueron siempre unas bestias mudas. Por ese polémico descubrimiento es acusado de herejía, y aunque de eso no se habla en la película, sospecho que también pierde su financiación. Evoco a Cornelius porque varios científicos hemos estado dando forma recientemente a una nueva disciplina científica que calca su trabajo. Desde hace más de 150 años el vocablo «arqueología» ha descrito el estudio de los vestigios físicos del pasado exclusivamente humano. En aquel entonces surgieron multitud de disciplinas versadas en épocas, lugares o métodos particulares, pero todas compartían un mismo tema central: conocer a la humanidad. Los animales formaban parte del estudio arqueológico, pero solo como fuente de alimento, transporte, compañía o parásitos. Orbitaban en torno a nuestro mundo.

Nadie pone en duda que con ese punto de vista se han cosechado logros extraordinarios. Por ejemplo, en 2015 Sonia Harmand y su equipo de la Universidad Stony Brook ampliaron el registro del comportamiento humano hasta más de tres millones de años con el hallazgo de útiles líticos abandonados por un antepasado remoto en el yacimiento de Lomekwi, en Kenia. (No es casual que sean de piedra. En la inmensa mayoría de ese registro, que abarca millones de años, los útiles de ese material han sido los únicos artefactos culturales que han sobrevivido y pueden informarnos acerca de nuestro origen; los fabricados con otros materiales perecederos han sucumbido al paso del tiempo.)

Al fijar la atención en nuestros parientes más cercanos en la escala evolutiva, los simios inferiores y superiores, la arqueología de primates pretende dibujar una trama más detallada para entender la larga historia del desarrollo técnico de nuestra especie. Los humanos y nuestros ascendientes directos somos primates, y dilucidar nuestro viaje evolutivo sigue siendo uno de los objetivos primordiales de esta investigación. Situar la génesis asombrosamente compleja de la tecnología humana en un contexto biológico más amplio nos permitirá discernir mejor los rasgos de la herencia primate común de aquellos que son propios de nuestra especie.

PRUEBAS INEXISTENTES

El motivo por el que los arqueólogos se han interesado únicamente por la recuperación de las culturas materiales humanas se debe, en buena medida, a la creencia de que la facultad de fabricar y usar herramientas era patrimonio exclusivo del linaje humano. La primatóloga Jane Goodall fue la primera en refutar esa idea gracias al estudio de los chimpancés en la década de 1960. El antropólogo Louis Leakey había descubierto fósiles humanos y útiles líticos en antiguos entornos lacustres de África oriental y quería saber a qué tipo de actividades podrían haberse dedicado nuestros ancestros. Así que contrató a Goodall y la envió a lo que es hoy el Parque Nacional del Río Gombe, en la margen oriental del lago Tanganika, en Tanzania, para estudiar el comportamiento de los chimpancés. Aunque sus descubrimientos tenían poco que ver con el lago, sus observaciones acerca de la fabricación y el uso de herramientas por parte de los chimpancés para obtener alimento cambiaron para siempre nuestra visión sobre las habilidades de los demás primates. Pero los chimpancés de Gombe (*Pan troglodytes schweinfurthii*) empleaban exclusivamente herramientas elaboradas con plantas, que perduran pocas semanas en el clima tropical. La disparidad entre la durabilidad de los útiles de piedra de millones de años de antigüedad, desenterrados en abundancia por Leakey, y la de las ramitas y briznas de hierba retocadas que Goodall descubrió era abismal.

Por suerte, los chimpancés demuestran una gran inventiva, y en la década siguiente otros investigadores descubrieron que grupos de la subespecie occidental (*Pan troglodytes verus*) manipulaban piedras para cascar frutos duros. Los análisis genéticos indican que esta subespecie se habría separado de la principal, en el centro de África, hace medio millón de años. Puesto que los chimpancés del centro y del este (como los de Gombe), o los de su especie hermana, el bonobo (*Pan paniscus*), desconocen el uso de las herramientas de piedra, parece plausible que la población occidental lo inventara en algún momento posterior.

Ese descubrimiento suscitó preguntas importantes sobre los orígenes de las herramientas líticas. Nuestro ancestro común

PÁGINAS ANTERIORES: MARK MacEWEN, NATURE PICTURE LIBRARY

probablemente manipuló útiles vegetales, a semejanza de los chimpancés y los bonobos, o de los orangutanes y los gorilas. Pero ¿por qué tan pocas ramas de nuestro árbol genealógico adoptaron la piedra como materia prima? Es más, los chimpancés en libertad demuestran tener una gama muy limitada de usos para las piedras, los cuales se basan sobre todo en la ventaja mecánica que ofrecen para romper la dura cáscara de una nuez o un fruto. En cambio, los humanos han confeccionado con ellas desde útiles de corte hasta puntas de proyectiles, desde joyas hasta las pirámides de Egipto o Mesoamérica. ¿Por qué son tan dispares las trayectorias de ambas especies?

Con solo dos ejemplos de tecnología lítica desarrollados de forma independiente por el ser humano y el chimpancé, resulta difícil discernir los pasos que dieron pie a su aparición. No podemos tomar lo que un grupo de chimpancés hace y extrapolarlo a nuestros primeros ancestros, con el argumento de que la tecnología humana nació de cascar frutos con herramientas. Sería tan poco sensato como tomar lo que un grupo de humanos modernos hace y trasladarlo a los ancestros de los chimpancés.

Uno de los grandes escollos radica en que apenas sabemos nada de la historia evolutiva del chimpancé. Los crecientes datos aportados por el ADN nos señalan que el ser humano y el chimpancé se separaron de su ancestro común hace unos siete millones de años. Pero los únicos vestigios fósiles que conocemos de este último son tres dientes datados en torno a medio millón de años. Y sus herramientas más antiguas conocidas tienen poco más de 4000 años. Por consiguiente, el conocimiento acerca de nuestros hermanos simios se limita a una suerte de presente eterno; nuestra perspectiva depende casi por entero de las últimas décadas. Si examináramos a la humanidad en ese mismo marco temporal fugaz, averiguaríamos muy poco sobre la génesis de la tecnología y su evolución a lo largo de nuestra historia como especie. Si tuviéramos que adivinar los útiles que empleaban nuestros ancestros para comer, ¿elegiríamos los palillos chinos o los cubiertos? ¿Son las consolas *PlayStation* o *Xbox* la forma más primitiva de ingenio lúdico? Estas preguntas pueden parecer absurdas, pero los científicos suelen pasar por alto que los chimpancés del pasado tal vez no se comportaban como los de hoy. ¿Eran menos ingeniosos? ¿O lo eran más?

Hemos llegado al final de la arqueología antropocéntrica; en adelante, la disciplina debería poner en su punto de mira todo comportamiento del pasado

Otro problema primordial es que una comparación en ambos sentidos ofrece pocas pistas de la razón por la que ciertas características surgieron en un linaje y no en otro. Ya en la década de 1860, el naturalista inglés John Lubbock (quien acuñó los vocablos *Paleolítico* y *Neolítico* para las divisiones de la Edad de Piedra) planteó que la apertura de frutos duros en los primates podría ser un simple precursor de la acción humana de golpear las piedras entre sí a fin de obtener lascas afiladas para el corte. De ser así, ¿por qué los chimpancés actuales no extraen lascas? ¿Obedece la ausencia de esa conducta a una falta de imaginación, de tiempo o de oportunidad? Deberíamos disponer de una selección más extensa de casos de estudio para someter a prueba nuestras hipótesis sobre la génesis de la tecnología. Y es aquí donde los monos que he estado estudiando acuden a nuestro rescate.

JUEGO DE PIEDRAS

De vuelta en la playa tailandesa, el hoyo se estaba anegando. El agua se filtraba por los lados amenazando con socavar y desestabilizar las paredes aún más. Conecté una bomba de achique marina a una batería de automóvil para mantener bajo el nivel, pero era una lucha perdida. Con las olas lamiendo ya mis pies, recogí con cuidado una serie de piedras volcánicas, todas con marcas y muescas distintivas en su superficie rugosa.

Gracias a la labor desempeñada en la pasada década por los primatólogos Suchinda Malaivijitnond, de la Universidad de Chulalongkorn en Tailandia, y Michael Gumert, de la Universidad Politécnica de Nanyang, en Singapur, sabemos ahora que los macacos cangrejeros birmanos (*Macaca fascicularis aurea*) de Piak Nam Yai y otras islas de la costa del mar de Andamán usan piedras como herramientas. El comportamiento se extiende al norte, de Tailandia a Birmania, donde el capitán de navío británico Alfred Carpenter lo describió por primera vez hacia 1880 en una crónica que al parecer permaneció mucho tiempo en el olvido. Solo a inicios de 2005, en el curso de los estudios destinados a evaluar los daños del devastador maremoto del Índico en 2004, se redescubrió el uso de herramientas por los macacos.

A la vista de las semejanzas entre las observaciones decimonónicas con las del presente siglo, el uso parece arraigado. Cuando las aguas retroceden, los monos bajan de los bosques del interior de la isla. Escogen en la orilla piedras del tamaño de su mano y golpean las conchas de las ostras aferradas a las rocas que la bajamar deja al descubierto. Les basta con asestar cinco o seis golpes para abrir una y llevan consigo la misma piedra en todo momento. En casos excepcionales, mi equipo ha llegado a contabilizar más de 60 ostras abiertas de una vez con ella.

Este bivalvo no es el único manjar que devoran con la ayuda de un utensilio. En la zona intermareal abunda la vida animal. Los macacos prefieren las ostras, pero no desdeñan las caracolas o los cangrejos. Pero, a diferencia de las primeras, estas presas corren y huyen, por lo que las atrapan y las depositan sobre alguna roca plana cercana. Allí buscan una piedra mucho más grande que las escogidas para abrir ostras, de hasta varios kilogramos, con la que aplastan su bocado sobre la roca, que hace las veces de yunque. Cuando el grupo entero se da el festín, el martilleo de las piedras contra las conchas colma el aire.

Al término de la incursión de marisqueo durante la bajamar, la orilla queda sembrada de conchas rotas y piedras maltrechas. Los monos demuestran pericia en la elección y el uso: con las puntas de las piedras pequeñas golpean certeramente las ostras y con la parte central de las piedras grandes aplastan las caracolas. Ambas técnicas instrumentales mellan las herramientas de un modo reconocible. Junto con mis colaboradores hemos demostrado que es posible deducir el uso a partir del desgaste, discernible de las marcas dejadas por la erosión natural, y así identificar con bastante seguridad las presas. Son esas marcas peculiares las que busco cuando escarbo en la arena de la playa. Las pequeñas rocas volcánicas que rescaté de la marea lucían las típicas del marisqueo de ostras. Y si bien estos artefactos no se remontan hasta los inicios del uso de herramientas en los macacos —los más antiguos están datados en solo 65 años—, son las primeras de este primate descubiertas en una excavación arqueológica.

CAPUCHINOS Y ANACARDOS

Los macacos no son los únicos monos que han dejado tras de sí un registro arqueológico. Hacia finales de 2014, volvía a estar junto

a un hoyo cuadrado, pero esta vez la brisa marina no aliviaba el calor. Me rodeaban el matorral y las altas mesetas de arenisca del Parque Nacional de la Sierra de Capivara, en el noreste semiárido de Brasil. Una cuadrilla de estudiantes de grado de la cercana Universidad San Raimundo Nonato andaba excavando, mientras Tiago Falótico y Lydia Luncz, que en aquel momento realizaban un posdoctorado conmigo, registraban los hallazgos. Por suerte, allí no llegaba ninguna marea inoportuna, solo algún que otro escorpión o araña, molestos porque revolviéramos la hojarasca.

La razón de hallarnos en aquel lugar era que los capuchinos (*Sapajus libidinosus*) que habitan en el parque habían resultado ser unos maestros de la tecnología. En 2004, Dorothy Fragaszy, de la Universidad de Georgia, y Elisabetta Visalberghi, del Instituto de Ciencia y Tecnología de la Cognición de Italia, expertas en capuchinos, describieron el uso de herramientas de piedra en individuos de esta especie en un hábitat similar, a unos 300 kilómetros de distancia. Ahora sabemos que los capuchinos de numerosos lugares del interior de Brasil usan piedras pesadas para cascar los frutos duros de un modo que recuerda vagamente a la conducta instrumental de los chimpancés occidentales. Los capuchinos de la Sierra de Capivara demuestran ser notoriamente creativos. Además de para cascar frutos, se sirven de las piedras para escarbar en busca de raíces o arañas ocultas bajo el suelo. En otro paralelismo con sus parientes africanos, escogen ramitas que quiebran, deshojan y seguidamente recortan con los dientes para convertirlas en bastoncillos con que atrapar presas escurridizas, como lagartijas cobijadas en grietas.

Un alimento en particular atrajo nuestra atención durante la excavación. El anacardo o cajú es un árbol autóctono de esta región brasileña que hoy se cultiva con fines comerciales en todo el mundo. Su semilla es nutritiva a la par que deliciosa, pero los frutos verdes segregan un látex cáustico que provoca dolorosas quemaduras en la piel. Así que los capuchinos recurren a pesados percutores para acceder a su interior. El método es eficaz y, por suerte para nosotros, deja reveladoras marcas de percusión y manchas del oscuro látex en las herramientas. Con la búsqueda y el cartografiado de las piedras que los capuchinos han acumulado tras años de uso, es posible conocer la situación de los enclaves del bosque que explotan con más frecuencia. Puesto que las condiciones del suelo, humedad y sombra que el anacardo precisa para prosperar no han variado sensiblemente desde hace milenios, es lógico pensar que los lugares frecuentados hoy por los capuchinos también lo fueron antaño. Las excavaciones hechas en una selección de ellos han corroborado esa idea. Hallamos como mínimo cuatro fases del empleo de herramientas en el pasado, reflejadas en grupos de percutores y yunques enterrados con evidentes señales de desgaste por el uso. En favor de nuestra conclusión de que habían sido utilizados por capuchinos, no hallamos signo alguno de actividad humana: ni fuego ni cerámica ni ningún útil lítico que recordara a los de factura humana.

El estrato más antiguo que albergaba herramientas de capuchinos data de entre 2400 y 3000 años. Eso los convierte en los artefactos no humanos más antiguos fuera de África, testimonio del comportamiento de unos monos que vivieron mucho antes de la colonización europea de América. No hallamos indicio alguno de herramientas vegetales en el curso de las excavaciones, pero, igual que en los humanos y otros simios superiores, tal ausencia se debe seguramente a la mayor durabilidad de la piedra en comparación con la madera de los bastones.

El hallazgo de útiles pertenecientes a otra especie de primate en una excavación arqueológica ya habría sido recompensa suficiente a nuestro esfuerzo. Pero los capuchinos de la Sierra de Capivara nos reservaban una sorpresa. Durante la misma campaña, los filmé golpeando con percutores otras rocas que estaban encastradas en un gran bloque de conglomerado. Obtenían así polvo de cuarzo, que después lamían o inhalaban. Ese comportamiento no era inédito, pero cuando recogí pedazos rotos de piedra y excavé alrededor del bloque de conglomerado, descubrí algo que sí lo era: las esquirlas pétreas de los capuchinos guardaban un parecido inconfundible con las lascas desenterradas en algunos yacimientos de antepasados humanos remotos. El análisis minucioso de las piedras efectuado por otro de mis posdoctorandos en la Universidad de Oxford, Tomos Proffitt, demostró que habíamos descubierto el primer ejemplo de un primate no humano que rompía piedras de forma deliberada sin mostrar interés por las lascas afiladas.

Seamos claros: no se ha visto que los capuchinos usen las lascas que producen. En condiciones naturales, ese comportamiento sigue siendo exclusivo de los humanos, por ahora. Pero si las lascas constituyen un subproducto accidental del uso reiterado de los percutores en una actividad insólita hasta la fecha, obtener polvo para ingerir, el hallazgo suscita preguntas notables sobre partes del registro arqueológico de la prehistoria humana. Los arqueólogos se han inclinado a suponer que los humanos arcaicos golpeaban premeditadamente las rocas para extraer lascas afiladas con algún fin, como tajar la carne. A tenor de lo visto en los capuchinos, empero, cabe preguntarse si hace tres millones de años nuestros antepasados no habrían mostrado la misma indiferencia por esas piedras afiladas que estaban generando. ¿Las estarían produciendo durante largo tiempo antes de caer en la cuenta de su utilidad para el corte? Con franqueza, no lo sabemos. Pero ahora debemos tener en cuenta al menos esa posibilidad. Sin duda, allanaría el camino para aceptar el corte como una innovación si hubiera un modo conocido y fiable para fabricar los útiles, lo que supondría dar el salto conceptual de considerar las lascas un producto del azar a considerarlo un recurso valioso.

PRIMATES APARTE

Sean cuales sean las lecciones que extraigamos para nuestra propia evolución tecnológica, los descubrimientos de Brasil y Tailandia hacen que ahora dispongamos de registros arqueológicos de tres linajes de primates no humanos. Llegados a este punto, merece la pena reflexionar unos segundos sobre ello. Hace apenas una década supimos por primera vez de la existencia de monos en libertad que manejaban herramientas de piedra. Ahora hemos dado los primeros pasos para seguir el rastro de esa conducta hasta el pasado remoto. El linaje humano actual solo constituye una cuarta parte del registro arqueológico conocido de los primates, si bien es con mucho el mejor estudiado.

En un artículo reciente, nuestro equipo planteaba que hemos llegado al final de la arqueología antropocéntrica; en adelante, la disciplina debería poner en su punto de mira cualquier comportamiento del pasado. Algunos especialistas discreparán de mi aseveración de que la arqueología es un mero método, aplicable a cualquier animal que deje un testimonio material duradero de su conducta, y no una ciencia reservada a nuestra estirpe. Pero el trabajo de un pequeño grupo de arqueólogos de primates ha revelado que puede abrir nuevas formas de ver tanto nuestra senda evolutiva como la de otras especies. Sin duda, la tecnología, la integración hábil y aprendida de la cultura material en nuestras vidas, no es una singularidad humana. Para surgir, no precisa un lenguaje ni la enseñanza o la cooperación





UN CAPUCHINO (*Sapajus libidinosus*) de Brasil empuña una piedra para abrir un fruto de anacardo (*1*). Las mismas marcas de desgaste y manchas que aparecen en los útiles empleados hoy por este primate se han observado en piedras desenterradas en yacimientos arqueológicos de entre 2400 y 3000 años de antigüedad (*2*).

MICHAEL HASLAM

al estilo humano, ni siquiera de un cerebro voluminoso: el de los capuchinos y los macacos supone en torno al 5 por ciento del cerebro de un humano adulto.

Es más, el uso de útiles líticos ha surgido de manera independiente por lo menos en cuatro ocasiones en la historia evolutiva reciente de los primates: en ambientes costeros (macaco), lacustres (humanos), selváticos (chimpancé) y semiáridos (capuchino). Esta diversidad nos hace pensar que la misma conducta podría haber surgido reiteradamente en el pasado en muchos taxones de primates, aunque hoy no den muestra de ella o se hayan extinguido. Y de ser cierto ese supuesto, los instrumentos líticos usados por esos taxones deberían seguir ahí, en algún lugar, aguardando a ser descubiertos.

No hay razones para que nos detengamos en los primates. En los últimos años he emprendido trabajos arqueológicos con nutrias marinas en la costa oriental de EE.UU., en colaboración con la etóloga Natalie Uomini, del Instituto Max Planck de Ciencias de la Historia Humana, en Jena, y expertos del Acuario de la Bahía de Monterey y de la Universidad de California en Santa Cruz. Hemos averiguado que las nutrias regresan a puntos preferidos de la costa para comer moluscos, donde abandonan piedras melladas y pilas de conchas vacías que pueden ser fácilmente confundidas con los restos del marisqueo humano en la prehistoria. El ciclo de retroalimentación entre estos modeladores duraderos del paisaje y la atracción de los animales jóvenes por aprender a usar las herramientas puede ser un componente esencial de las tradiciones tecnológicas entre las nutrias marinas, como el ciclo entre los apreciados anacardos y los capuchinos.

Junto con Uomini hemos efectuado también trabajos de campo sobre el cuervo de Nueva Caledonia (*Corvus moneduloides*), famoso por su refinado uso de herramientas y sus habilidades cognitivas. Este córvido visita con regularidad ciertos lugares de su entorno; si emplearan útiles de materiales duraderos, tendríamos todos los ingredientes necesarios para la formación y la supervivencia de yacimientos arqueológicos que nos permitirían reconstruir el comportamiento pretérito de esta ave. La arqueología es por naturaleza una ciencia interdisciplinar, e incorporar a sus objetivos de investigación el uso de herramientas por parte de animales en el pasado ha supuesto un paso satisfactorio e incluso intuitivo.

Por azar, el reciente auge de la arqueología primate ha coincidido con el estreno de una nueva saga de *El planeta de los simios*. En ella, los simios antropomorfos conciben técnicas rudimentarias que, sin embargo, sobrepasan con rapidez a las conocidas en otros animales salvajes. Hasta una sencilla lanza compuesta, resultado del encaje de una punta afilada en un astil de otro material, exige un salto intelectual que parece no existir en las herramientas de los simios actuales. El control del fuego y el uso de joyas son atributos igualmente extraordinarios de los simios en esas películas, pues no existen ejemplos reales de tales conductas fuera del linaje humano.

Pero los simios tecnológicos que contemplamos en la pantalla no parecen completamente aberrantes. Incluso son plausibles. Los chimpancés occidentales fabrican lanzas simples de una pieza para atacar a pequeños primates, a semejanza de los capuchinos con las lagartijas. William McGrew de la Universidad de St. Andrews en Escocia, el mejor observador del uso de herramientas por chimpancés y un viejo partidario de la arqueología primate, describió cómo un chimpancé oriental llevaba anudada una «estola» hecha con la piel de un mono. ¿Qué más ocurrirá cuando los observadores y sus libretas de campo no los siguen?

La arqueología humana ha emergido como una fuente fiable para profundizar en nuestro desarrollo y diversidad, gracias al esfuerzo colectivo de miles de científicos y eruditos y una ingente cantidad de dinero invertida durante más de un siglo. Como recompensa, ahora disponemos de millones de años de cultura material que pueden servir como un entramado para nuestras especulaciones y escenarios evolutivos. Acabamos de franquear la línea de salida en nuestro empeño por levantar una estructura similar para los animales. Con una mentalidad abierta, ¿quién sabe lo que podremos encontrar? Ha llegado el momento de cavar el siguiente hoyo. IyC

PARA SABER MÁS

Archaeological excavation of wild macaque stone tools. Michael Haslam et al. en *Journal of Human Evolution*, vol. 96, págs. 134-138, julio de 2016.
Pre-Columbian monkey tools. Michael Haslam et al. en *Current Biology*, vol. 26, n.º 13, págs. R521-R522, julio de 2016.
Wild monkeys flake stone tools. Tomos Proffitt et al. en *Nature*, vol. 539, págs. 85-88, noviembre de 2016.
Primate archaeology evolves. Michael Haslam et al. en *Nature Ecology & Evolution*, vol. 1, n.º 13, págs. 1431-1437, septiembre de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los albores de la tecnología. Kate Wong en *IyC*, julio de 2017.

MEDICINA

ACABAR CON EL SILENCIO



Después de algunos tropiezos, la terapia génica avanza en su lucha contra la sordera

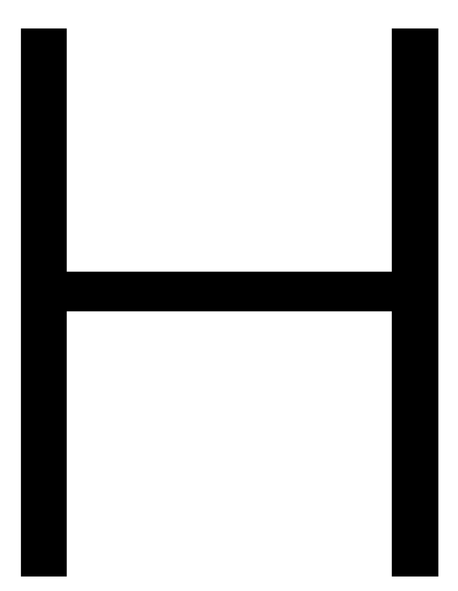
Dina Fine Maron

FOTOGRAFÍAS DE ETHAN HILL


PHONAK

Dina Fine Maron, antigua editora asociada de *Scientific American*, ejerce actualmente como reportera de investigación de reservas naturales para *National Geographic*.





Hannah Corderman intenta llenar los vacíos en su vida, pero estos son cada vez mayores. No siempre puede seguir las charlas, por lo que asiente con la cabeza o sonríe en el momento que cree oportuno, según los gestos y la mirada de quienes la rodean. Captar ciertas palabras resulta difícil, aunque le hayan aumentado el volumen de los audífonos. «Me pierdo muchas cosas de la conversación, pero me las apaño.»

No perder el hilo es cada vez más arduo. Nuestra protagonista padece una afección hereditaria denominada síndrome de Usher que le priva, poco a poco pero sin remedio, de dos sentidos principales. Una mutación genética impide que las células del oído interno y de la retina dispongan de las proteínas necesarias para captar los sonidos y la luz. A la pérdida auditiva, se le suma el defecto visual, que ha empeorado hace poco. Antes de cumplir la veintena no podía conducir por la noche; ahora, a los 24 años, presenta puntos ciegos que le dificultan la visión diurna. Ningún tratamiento por ahora detiene o frena la enfermedad y Hannah sabe que en diez años, tal vez en veinte si el deterioro es lento, podría quedarse sorda y ciega.

Durante su niñez el trastorno aparentaba ser una simple hipoacusia, pero más adelante, cuando cursaba la secundaria, al elevar la vista al cielo un verano, en su casa de Needh (Massachusetts, EE.UU.), le dio la impresión de que las estrellas desaparecían de una en una. Pensó que tal vez las velaban las nubes, pero los problemas no cesaron y, al fin, le diagnosticaron el síndrome de Usher de tipo 2A, un trastorno que afecta a los sentidos de la vista y del oído y que empeora de forma paulatina con los años. En la entrevista que mantuvimos, me dijo que aceptaba con serenidad las noticias sobre su enfermedad, y añadió que, una vez asumida, decidió proseguir con su vida de siempre. Siete años han transcurrido desde el diagnóstico: ha terminado sus estudios y trabaja en el departamento de *marketing* de la empresa de construcción familiar, sin dejar de plantar cara, en la medida de lo posible, a un trastorno que ella insiste en que no la doblegará.

EN SÍNTESIS

La hipoacusia es uno de los defectos congénitos más frecuentes. Su principal causa obedece a fallos genéticos. La terapia génica, un tratamiento experimental de pasado azaroso, podría poner remedio.

La seguridad y la eficacia de esta terapia han mejorado en los últimos tiempos, y ha sido aprobada para diversas afecciones humanas. Las indicaciones terapéuticas se amplían, en la actualidad, a la sordera.

Ratones sordos han recuperado la audición en niveles sin precedentes gracias a la inyección de virus portadores de genes normales.

Poco pueden hacer los médicos en su caso. En algún momento se le podría colocar un implante coclear, un aparato que, sorteando las células ciliadas, estimula el nervio auditivo y permite, de algún modo, la percepción de los sonidos. Pero no deja de ser un remedio temporal. En los ojos, el implante retiniano, un chip eléctrico que estimula las células fotorreceptoras, no se utiliza mucho, pues no proporciona una visión similar a la real.

Hannah no es una lectora asidua de revistas científicas, pero sabe que no muy lejos de su casa, en unos laboratorios de Boston, viven cientos de ratones con un trastorno auditivo congénito experimental similar al suyo que mejoran gracias a una técnica denominada terapia génica. Los científicos les administran ADN sano para sustituir los tramos alterados del genoma que producen proteínas defectuosas. El año pasado, Gwenaëlle Géléoc, bióloga del Hospital Infantil de Boston, y sus colegas informaron de una «recuperación sin precedentes» en estos roedores tras la infusión de ADN en el oído interno, que restauró su capacidad auditiva hasta un nivel casi normal. Más o menos al mismo tiempo, un equipo de la Escuela de Medicina de Harvard comunicó un restablecimiento de la audición más modesto, por medio de un método genético similar en ratones aquejados de otro trastorno hereditario. Un tercer equipo de la zona de Boston empleó hace poco un método de edición o modificación génica para desactivar un gen defectuoso en «ratones Beethoven», roedores con otra forma de deterioro auditivo progresivo, cuyo nombre rememora al célebre compositor sordo. Tales avances alimentan por primera vez la esperanza de poder tratar o frenar algún día los trastornos hereditarios de la audición, uno de los defectos congénitos más frecuentes.

RESULTADOS ALENTADORES

La terapia génica tiene un pasado azaroso. Uno de los ensayos pioneros, a cargo de investigadores de la Universidad de Pensilvania en 1999, culminó con un desenlace funesto a raíz de la muerte de Jesse Gelsinger, un paciente de 18 años aquejado por una hepatopatía. Con el fin de insertar los genes en su cuerpo se optó por un virus, pero la dosis y el tipo escogidos causaron una grave alteración del sistema inmunitario, que acabó atacando a los órganos. La tragedia enfrió el entusiasmo y la financiación pública e hizo que muchos desistieran de ir más lejos.

Con todo, otros investigadores continuaron trabajando en silencio con la técnica, centrándose primero en células y animales, con la esperanza de elaborar terapias contra trastornos complejos como la artrosis, el cáncer o la diabetes de tipo 1. Como medida de seguridad, redujeron las dosis del virus usado como vehículo, a fin de evitar la hiperreacción del sistema inmunitario. Asimismo, descartaron el tipo de virus que se le había administrado a Gelsinger, un adenovirus, en favor de otros tipos para sus experimentos. Así hallaron una alternativa prometedora que logró buenos resultados en los ensayos: un virus adenoasociado (AAV, por sus siglas en inglés), un vehículo génico que no altera el sistema inmunitario al no ser dañino para las células humanas. En ocasiones, los vectores víricos se inyectan empaquetados dentro de células para limitar su acción a una diana concreta. Esta técnica permite «emparejar el vehículo correcto con la enfermedad y la diana adecuadas y conocer la dosis y la localización del virus en el organismo», comenta Cynthia E. Dunbar, científica de los Institutos Nacionales de la Salud y presidenta de la Sociedad Americana de Terapia Génica y Celular.

Las mejoras han funcionado. La Administración de Alimentos y Medicamentos de EE.UU. (FDA) ha otorgado hace poco las primeras autorizaciones de genoterapia para el ser humano. Todo indica que se trata de un concepto cuya hora ha llegado. En agosto de 2017, dicho organismo aprobó la especialidad Kymriah, constituida por un vehículo vírico, para un tipo de leucemia infantil. Y en diciembre de ese mismo año, autorizó la primera terapia génica para una forma rara de ceguera hereditaria. En este momento, afirma Dunbar, las empresas farmacéuticas y los inversores de capital riesgo están destinando una gran cantidad de recursos a la genoterapia. A la reunión anual de la Sociedad celebrada en 2018 asistieron cerca de 3400 personas, frente a las 1200 de hace cinco años.

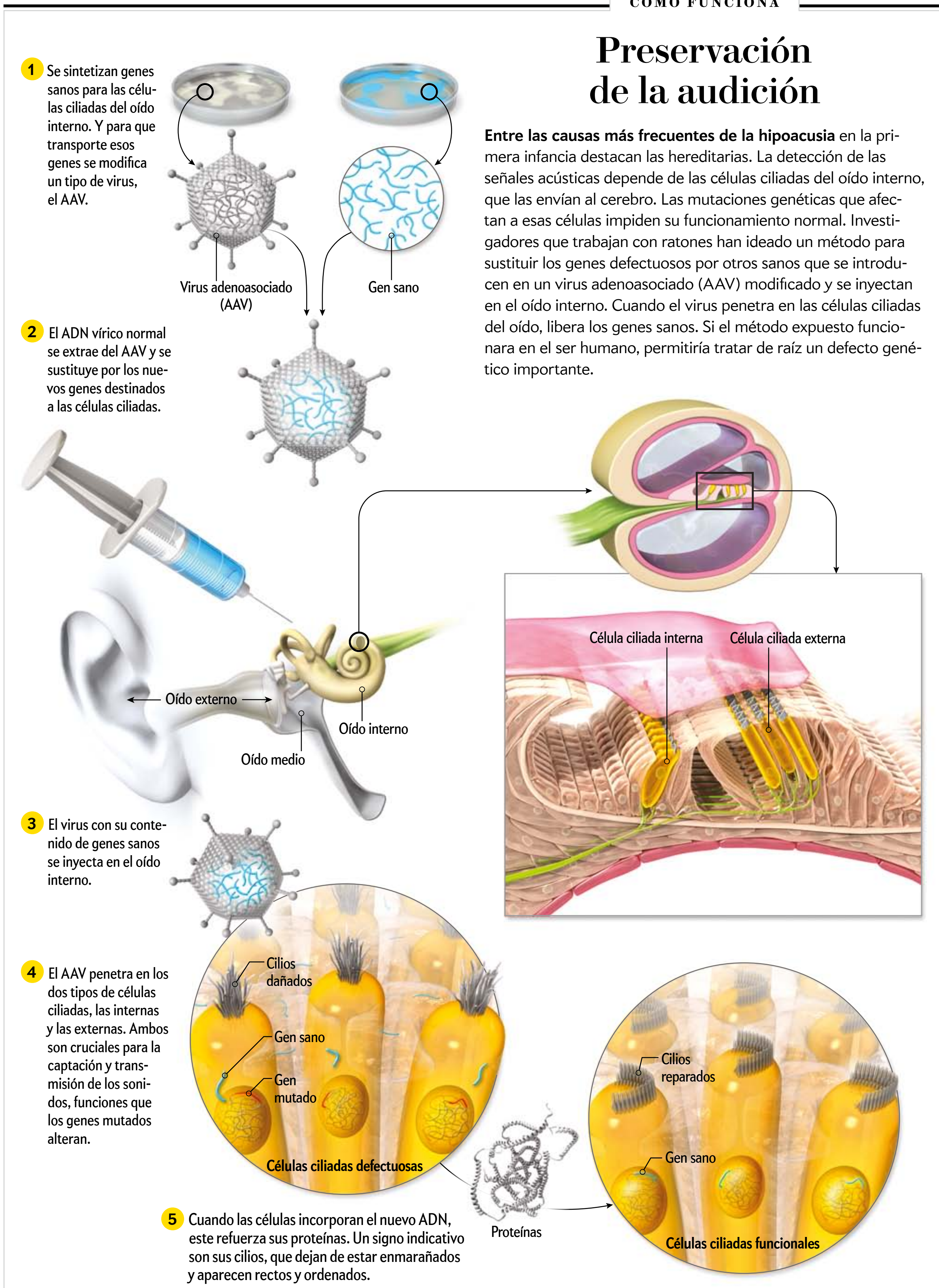


HANNAH CORDERMAN nació con el síndrome de Usher, una enfermedad hereditaria que provoca la pérdida progresiva de la audición y la visión.

Ahora, ese entusiasmo se ha contagiado a la hipoacusia, un trastorno con frecuencia hereditario. Comúnmente vinculada al envejecimiento o a los accidentes, la pérdida auditiva es en realidad uno de los trastornos congénitos más habituales, pues afecta a tres de cada 1000 recién nacidos. Un defecto genético es el culpable de más de la mitad de los casos, que incluyen

Preservación de la audición

Entre las causas más frecuentes de la hipoacusia en la primera infancia destacan las hereditarias. La detección de las señales acústicas depende de las células ciliadas del oído interno, que las envían al cerebro. Las mutaciones genéticas que afectan a esas células impiden su funcionamiento normal. Investigadores que trabajan con ratones han ideado un método para sustituir los genes defectuosos por otros sanos que se introducen en un virus adenoasociado (AAV) modificado y se inyectan en el oído interno. Cuando el virus penetra en las células ciliadas del oído, libera los genes sanos. Si el método expuesto funcionara en el ser humano, permitiría tratar de raíz un defecto genético importante.



EMILY COOPER

enfermedades como el síndrome de Usher. Este último constituye un objetivo interesante, pues los afectados presentan un solo gen mutado cuya reparación podría acabar con los síntomas. Algunas formas de la enfermedad, como la de Hannah, empeoran de forma gradual, por lo que, una vez diagnosticada, habría cierto tiempo para que un eventual tratamiento pudiera paliar el daño. La lesión afecta a las células ciliadas del oído interno, cuyos cilios captan las ondas sonoras del exterior y las transmiten al cerebro. Hannah y otros pacientes como ella son portadores de un gen defectuoso que debilita esas células y que, en palabras de David Corey, uno de los expertos de Harvard que han logrado mejorar la audición en los ratones, «son como las bujías de un automóvil: cuando fallan, la audición deja de funcionar».

La aplicación de la genoterapia a esas células ataca de raíz la causa de la enfermedad, en lugar de colocar un «vendaje» de alta tecnología, como es un audífono. A juicio de Theodore Friedmann, pediatra que codirige un consorcio de investigadores de la genoterapia en la Universidad de California en San Diego, ajeno a la investigación, «los recientes éxitos son magníficos y muy relevantes, representan un primer paso esperanzador». Por supuesto, los ratones no son personas, por lo que habrá que ensayar la técnica en seres humanos. Pero según Friedmann, este tipo de intervenciones abren por primera vez la puerta al tratamiento de la sordera a nivel genético.

REPARACIÓN DE LAS CÉLULAS CILIADAS

En 2017, en un laboratorio de Harvard, observé una mañana a través de la puerta cómo Bence György manipulaba un ratón nacido con un defecto experimental hereditario de las células ciliadas. Este estudiante de posdoctorado, que trabajaba con Corey, le practicó al roedor anestesiado una incisión detrás de la oreja. A través de ella se abrió paso apartando láminas de tejido tan delgadas como el papel hasta dar con la membrana de la ventana redonda (o coclear), una zona diminuta que comunica el oído medio con el interno. Cuando la localizó, insertó una aguja fina e inyectó poco a poco una solución rosada que contenía alrededor de 200.000 partículas de un AAV, cada una de las cuales transportaba una forma corregida del gen responsable de la pérdida auditiva del roedor.

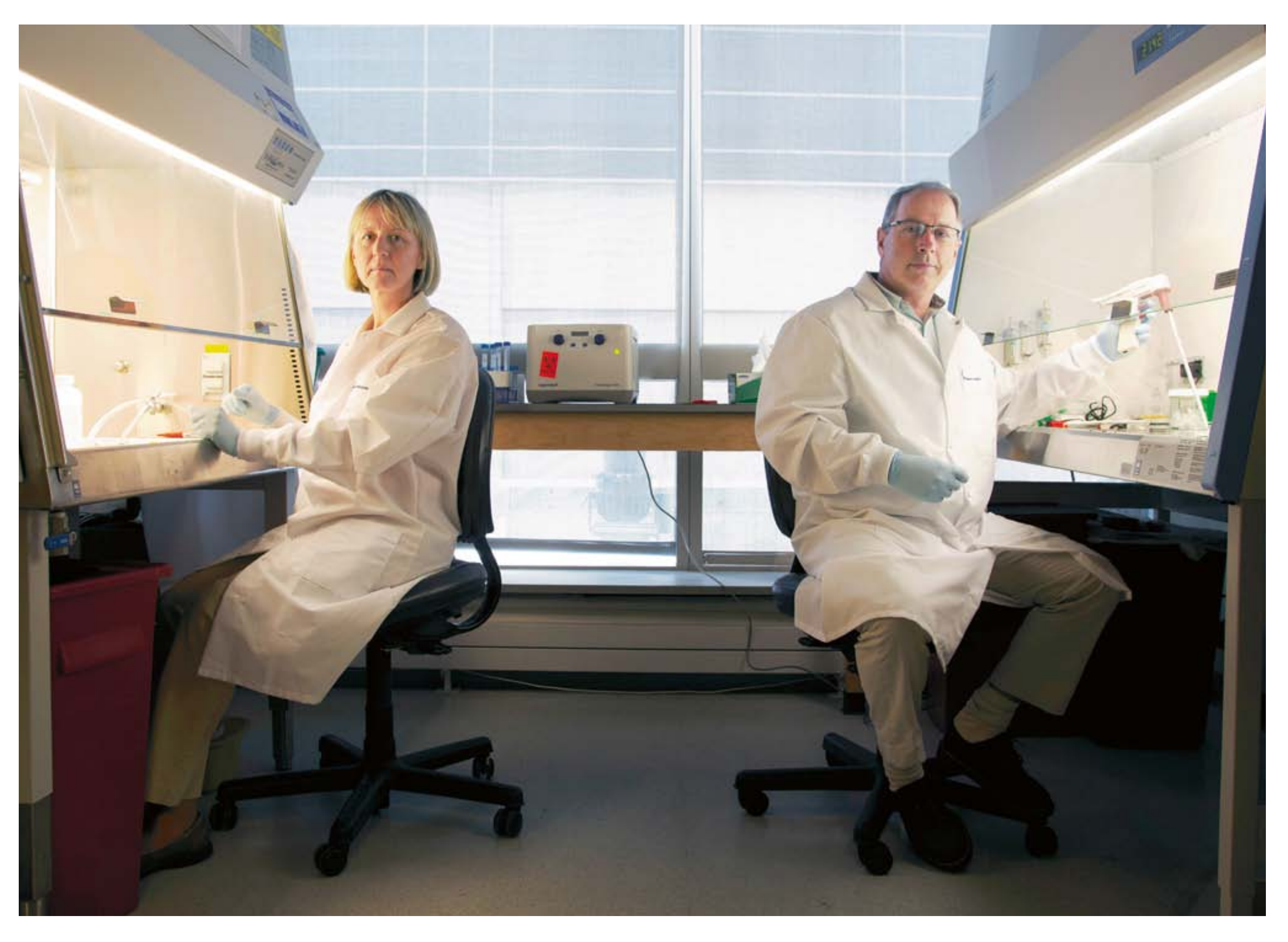
El empleo de un virus como transporte de ese precioso cargamento aumenta la probabilidad de que el gen llegue a su destino en el oído interno, pues hasta los virus inocuos penetran en las células. Pero los investigadores saben que no sirve cualquier AAV: es esencial que sea capaz de penetrar no solo en uno, sino en dos tipos de células ciliadas. Varios AAV liberan con bastante facilidad el ADN en las capas más internas de células ciliadas, las que se comunican con las neuronas, pero les cuesta más acceder a las capas externas, las únicas que en principio amplifican los sonidos. Para recuperar completamente la sensibilidad es preciso que el vehículo penetre en ambos tipos, indica Corey, que colaboró en una investigación decisiva sobre la función de tales células.

A base de prueba y error y gracias al rediseño parcial del gen vírico se obtuvieron unos cuantos AAV idóneos para las dos dianas del oído interno. Se modificaron las proteínas de la cubierta externa del virus, que intervienen en la unión de este a las células, para que fueran similares a las presentes en los dos tipos de células ciliadas, de modo que el virus pudiera penetrar en ellas. En un artículo publicado hace dos años, Géléoc y colaboradores comunicaron que uno de esos AAV modificados se insertó intacto en los roedores programados genéticamente para que padecieran sordera congénita y, de ese modo, originó hileras de células ciliadas fuertes y funcionales. Otros equipos de investigación han logrado introducir AAV afines en células ciliadas del oído interno de roedores adultos, cuyo aparato auditivo es más parecido al de un niño pequeño.

No obstante, alcanzar el interior de las células solo es una parte del problema que supone el tratamiento de la sordera. La otra estriba en localizar las mutaciones causantes de los defectos en las células ciliadas. Los primeros pasos en este sentido se dieron en la década de 1990, con el descubrimiento de familias con los defectos de audición y de visión característicos del síndrome de Usher y el cotejo de sus genomas. Estas personas presentaban varios genes anómalos aparentemente implicados en el desarrollo del oído y del ojo al mismo tiempo, lo que los convertía en los sospechosos principales. Entonces se diseñaron ratones portadores y exentos de tales mutaciones para comprobar si alguno de los cambios genéticos era el responsable de los síntomas. La comparación de los dos tipos de roedor apuntó a ciertas alteraciones específicas. Por ejemplo, los cambios en el gen *USH2A* son la base de trastornos progresivos como el de Hannah; las células ciliadas sanas contienen la versión no mutada de este gen. La forma más grave y precoz de la enfermedad, el síndrome de Usher de tipo 1, está vinculada a mutaciones en el gen *USH1C,* uno de los cinco conocidos.

En los últimos años, el equipo de Géléoc ha encajado todas esas piezas. En el laboratorio, ella y su marido, el otorrinolaringólogo Jeffrey Holt, ayudados por otros investigadores, tomaron una versión de AAV con una cápsula expresamente diseñada, extrajeron un grupo de los genes que regulan el ciclo biológico del virus y los sustituyeron por versiones sanas de *USH1C*. También añadieron una secuencia de ADN (denominada promotor) que activa *USH1C* en las células ciliadas. Cuando se libera, el nuevo

Una de las pruebas para comprobar la recuperación de la audición consiste en exponer a los roedores a un ruido fuerte y súbito y observar si reaccionan con un brinco. Muchos así lo hicieron: los ratones sordos podían oír



POR MEDIO DE UN VIRUS que transporta e inserta genes sanos, Gwenaëlle Géléoc y Jeffrey Holt, investigadores del Hospital Infantil de Boston, restauraron la audición en ratones sordos.

gen estimula a las células que aún presentan el ADN defectuoso y que, por tanto, fabrican proteínas débiles en los cilios, para que sinteticen multitud de proteínas sanas que mantengan estos apéndices fuertes.

El equipo del Hospital Infantil de Boston tomó todo el paquete, y aplicando un método de inserción quirúrgica similar al que vi usar a György, lo introdujo en ratones con el síndrome de Usher. En dos semanas, el virus ya había penetrado en algunas células ciliadas del oído y, en seis, se había extendido a cerca del 80 por ciento de ellas. Y no solo eso, sino que los roedores reaccionaban a los sonidos. Una de las pruebas más habituales para comprobar la recuperación de la audición consiste en exponerlos a un ruido fuerte y súbito, para observar si reaccionan con un brinco. El resultado permitió afirmar que los ratones antes sordos ahora oían.

El sonido no fue la única prueba de peso. Las células ciliadas desempeñan otra función clave: son responsables del equilibrio y de la orientación, pues cuando los cilios se mueven en el líquido del oído interno que los baña, envían señales al cerebro indicando la posición del cuerpo. Los ratones cuyos cilios están alterados por el síndrome de Usher suelen tener dificultades de movimiento y se desenvuelven de una manera peculiar en los espacios. En lugar de husmear por toda la jaula, permanecen arrinconados en una esquina y, pese a ser nadadores innatos —nadan con soltura desde el primer contacto con el agua—, el ratón con Usher bracea en círculos durante unos segundos para averiguar qué cara está «hacia arriba» (dorsal o ventral). (El investigador acude de inmediato en su ayuda para que no se estrese demasiado.) Si los ratones tratados con genoterapia en el Hospital Infantil de Boston habían recuperado de veras la función de las células ciliadas, estos problemas deberían haber desaparecido.

Cuando visité el laboratorio de Holt y Géléoc poco después de mi viaje a Harvard, contemplé ratones que actuaban como sus congéneres sanos. Los que habían recibido la genoterapia dos meses antes exploraban el entorno, y su comportamiento en los espacios abiertos y en el agua no se diferenciaba en nada del de sus compañeros normales. Su desenvoltura era tal que pregunté varias veces a Holt y a su equipo si estaban seguros de que se trataba de los ratones mutantes. Y ellos, que disponen de un esmerado sistema para saber qué ejemplares tienen ante sí en cada momento, me aseguraron siempre que estaba viendo a los roedores afectados y tratados.

LA DIMENSIÓN DEL PROBLEMA

A pesar del éxito, aún quedan dificultades que vencer antes de que estos virus puedan ensayarse en humanos. Una de ellas es que los AAV actuales son demasiado pequeños. Bastan para transportar los genes que corregirán el síndrome de Usher de tipo 1C, el trastorno que respondió tan bien en los ensayos con ratones, pero no los que intervienen en otros tipos de sordera, mucho más grandes. Por ejemplo, el tipo de síndrome que afecta

a Hannah depende de un gen cuyo tamaño excede la capacidad de los AAV. Como dice Dunbar: «Sería como embutir a alguien con una talla 44 en unos pantalones de la talla 34».

Una alternativa consistiría en cortar el gen grande en varios segmentos para que pudiera ser transportado al oído por otros tantos virus. Cada trozo dispondría de extremos adherentes para que, una vez en su destino, volvieran a unirse como un velcro. Por ejemplo, el gen Usher de Hannah es demasiado voluminoso, por lo que sería preciso dividirlo en tres. Los tres transportadores víricos se introducirían en las células ciliadas del oído interno y, a continuación, los tres segmentos de ADN deberían encontrarse y unirse de nuevo dentro de la célula. Las secuencias de ADN son muy específicas —por lo general, los segmentos del alfabeto genético solo interactúan en el organismo con otros segmentos complementarios— y no es fácil que el proceso culmine con éxito, advierte Géléoc.

Otras opciones consistirían en elegir un virus de otro tipo más grande, manipulado para no desatar una alarma generalizada en el sistema inmunitario, o bien en prescindir de los virus y recurrir a nanopartículas sintetizadas en el laboratorio para introducir en las células el material genético aprovechando su tamaño diminuto. Algunos investigadores, como Holt y Géléoc, también barajan un método para extraer el gen defectuoso y sustituirlo por el correcto mediante la técnica de edición o modificación genética, CRISPR/Cas9. El síndrome de Usher es un trastorno recesivo, causado por la concurrencia de dos copias (alelos) del mismo gen defectuoso. Si se pudiera eliminar una de ellas y cambiarla por otra del gen dominante sano, se evitarían los efectos negativos del ADN recesivo remanente.

La genoterapia no será de gran ayuda si no mejora el diagnóstico de la hipoacusia en la primera infancia

Sin embargo, hasta ahora nadie ha conseguido esa hazaña con la técnica CRISPR; el método parece más adecuado para cortar los segmentos que para unirlos de nuevo. Por ello, en la actualidad, CRISPR sería más útil contra los problemas auditivos de los ratones causados por una sola copia, no por dos. La copia problemática del gen quedaría anulada y la copia restante podría actuar con normalidad. En los experimentos con ratones Beethoven se aplicó este método y, pese a los buenos resultados, otros especialistas han observado con esa misma técnica cambios no deseados en el ADN de otras células ajenas al problema. Nadie cree, pues, que este tipo de modificación génica esté a punto para el ser humano, por lo que los vehículos víricos siguen siendo el método predilecto para el tratamiento.

Sea cual sea el sistema de liberación o cualquier otro remedio que se conciba, no será posible ayudar a muchas personas si no mejora el diagnóstico de la hipoacusia en la primera infancia, momento en que una intervención precoz sería más beneficiosa. En Estados Unidos la mayoría de los lactantes son sometidos a exámenes para detectarla, pero pocas veces se diagnostica un trastorno concreto o su origen genético. Esto es lo que le sucedió a Hannah, cuyo diagnóstico del problema hereditario se demoró hasta la escuela secundaria. Esta situación ha de cambiar para que los niños puedan ser tratados de la forma adecuada.

Los genoterapeutas están convencidos de que, tarde o temprano, habrá tratamiento para la sordera infantil. «Es apasionante que existan productos reales que vayan por esa vía», afirma Dunbar. A Elizabeth Olmsted-Davis, investigadora en la Escuela de Medicina de Baylor, no le sorprende que la genoterapia se haya convertido en los últimos tiempos en una realidad clínica para otras afecciones y que las nuevas aplicaciones sigan el mismo camino: «Los tratamientos que se avecinan son la culminación de décadas de trabajo por parte de investigadores de talento que aprecian las posibilidades de estas técnicas».

No hay duda de que la comunidad científica mantiene un vivo interés por la genoterapia, pero Hannah no cree que a ella le llegue la vez. Sea con avances médicos o sin ellos, está decidida a disfrutar de una vida plena. Ha reservado varios viajes para observar auroras boreales, por si llega un día en que ya no pueda verlas. «Diría que mi punto de vista sobre la vida ha cambiado radicalmente, pues siento que no me queda mucho tiempo para cumplir mis deseos», confiesa. También se ha convertido en defensora de otros pacientes como ella. Opina que hablar abiertamente sobre los problemas hereditarios ayuda al progreso de la investigación y «sirve para que otras personas aprendan a gozar de la vida y no permitan que la enfermedad gane la batalla». Dejar de oír no significa que uno deba recluirse en el silencio, concluye.

PARA SABER MÁS

Rescue of hearing by gene delivery to inner-ear hair cells using exosome-associated AAV. Bence György et al. en *Molecular Therapy*, vol. 25, n.º 2, págs. 379-391, febrero de 2017.

Gene therapy restores auditory and vestibular function in a mouse model of usher syndrome Type 1c. Bifeng Pan et al. en *Nature Biotechnology*, vol. 35, págs. 264-272, marzo de 2017.

Cochlear gene therapy with ancestral AAV in adult mice: Complete transduction of inner hair cells without cochlear dysfunction. Jun Suzuki et al. en *Scientific Reports*, vol. 7, n.º 45524, 3 de abril de 2017.

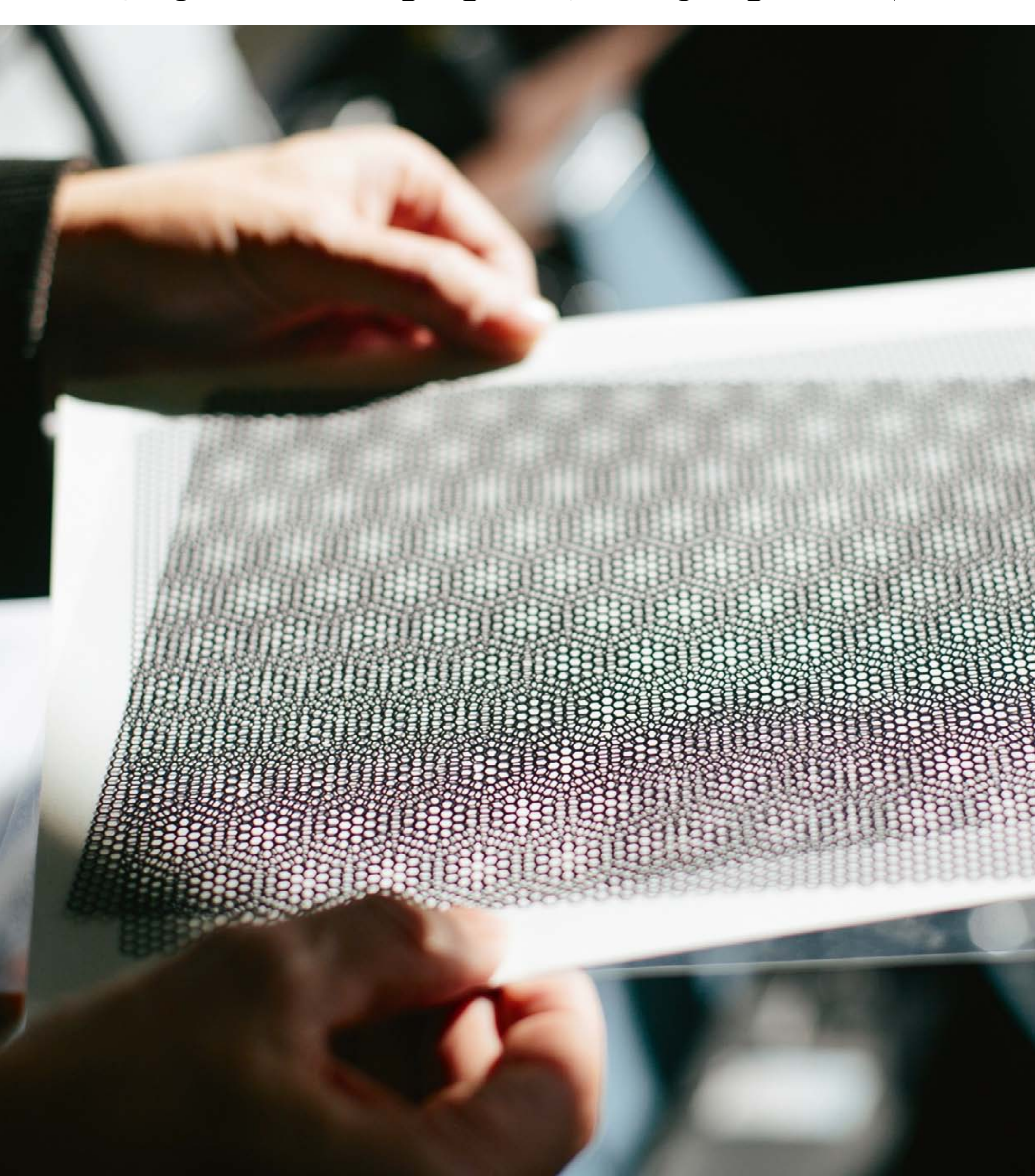
EN NUESTRO ARCHIVO

Problemas de la terapia génica. Theodore Friedmann en *IyC*, agosto de 1997.

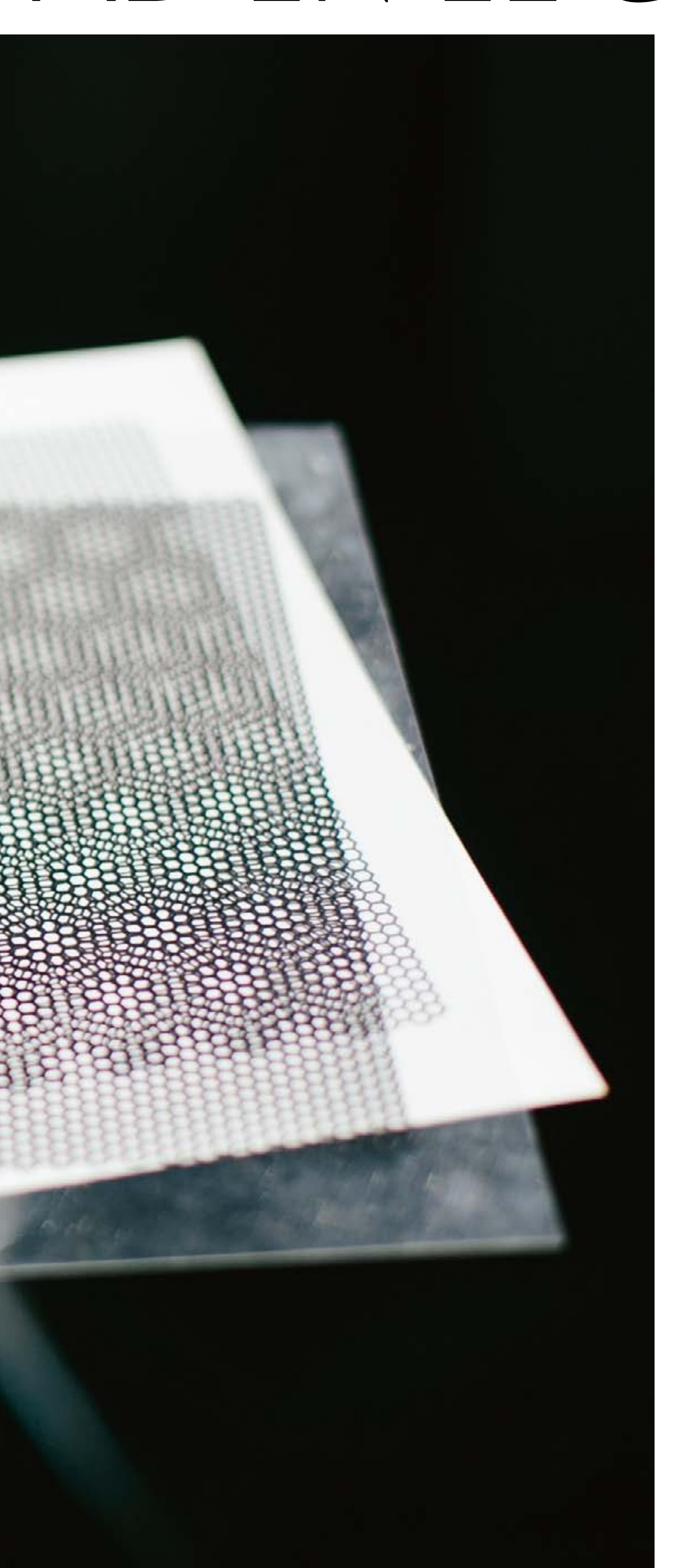
Genética de la sordera. Identificación de las moléculas de la audición. N. López Bigas, R. Rabionet y X. Estivill en *IyC*, febrero de 2001.

Terapia génica, segunda parte. Ricki Lewis en *IyC*, mayo de 2014.

SUPERCONDUCTIVID



AD EN EL GRAFENO



El hallazgo de un intrigante fenómeno en capas desalineadas de grafeno desconcierta a los físicos. Su comprensión podría ofrecer la clave de la superconductividad de altas temperaturas

Elizabeth Gibney

Fue lo más cerca que el físico Pablo Jarillo-Herrero había estado de sentirse como una estrella de rock. En marzo de 2018, cuando le llegó el turno de impartir una charla en Los Ángeles, pudo ver científicos apiñados en cada recoveco del auditorio. Los organizadores del congreso de la Sociedad Americana de Física tuvieron que retransmitir la sesión en una espaciosa sala adyacente, también abarrotada de gente en pie. «Sabía que teníamos algo muy importante, pero aquello fue una locura», cuenta el investigador.

La multitud había acudido a escuchar cómo el equipo de Jarillo-Herrero, del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), había descubierto un exótico comportamiento en el grafeno, el célebre material formado por láminas de carbono de un solo átomo de espesor. Sus excelentes propiedades conductoras eran ya conocidas. Sin embargo, el equipo del MIT había dado un salto de gigante, pues había hallado un método para convertir el grafeno en un superconductor: un material que no opone resistencia alguna al paso de la corriente eléctrica. Su grupo había logrado ese hito superponiendo una lámina de grafeno sobre otra, rotando una de ellas un cierto «ángulo mágico» y enfriando el conjunto hasta temperaturas muy cercanas al cero absoluto. Aquella rotación generaba un cambio radical en las propiedades de la doble capa: primero la transformaba en un aislante; luego, al aplicar un campo eléctrico, en un superconductor.

Ya con anterioridad se había conseguido que el grafeno exhibiera ese comportamiento. Sin embargo, para ello había que

combinarlo con materiales que ya eran superconductores o con otros elementos químicos. Pero la posibilidad de inducir las mismas propiedades sin más que «apretar un botón» llamó poderosamente la atención de la comunidad. «¿Que al colocar de cierta manera dos capas atómicas no superconductoras aparece de repente la superconductividad? Creo que eso sorprendió a todo el mundo», recuerda Chun Ning Jeanie Lau, física de la Universidad Estatal de Ohio.

Pero los físicos que asistieron a la conferencia estaban aún más entusiasmados por la razón por la que el grafeno parecía tornarse superconductor. Había indicios de que esas propiedades se debían a la existencia de fuertes correlaciones entre los electrones: un comportamiento que los físicos creen responsable de los exóticos estados observados en otros materiales más complejos. Algunos de estos sistemas llevan décadas desconcertando a los físicos; en particular, aquellos que se tornan superconductores a temperaturas relativamente elevadas (aunque aún muy inferiores a los cero grados Celsius). Así pues, si la superconductividad en el grafeno puro se debía al mismo mecanismo, el material podría convertirse en la piedra de Rosetta del fenómeno. Y ello podría ayudar a los físicos a encontrar materiales superconductores a temperatura ambiente, un hito que revolucionaría numerosas áreas de la tecnología moderna, desde el transporte hasta la computación.

«Casi todas las personas que conocía estaban entusiasmadas de verdad», comenta Lau. Sin embargo, mientras ella escuchaba la charla con asombro, otros no pudieron esperar. Andrea Young, físico de la materia condensada de la Universidad de California en Santa Bárbara, abandonó la sala para regresar a toda prisa a su laboratorio. Su equipo era uno de los pocos del mundo que ya estaban explorando el efecto de rotar capas de grafeno en busca de ciertos comportamientos extraños que habían sido predichos poco antes. Young revisó los artículos que el grupo de Jarillo-Herrero acababa de publicar en la revista *Nature*, donde habían aparecido en línea dos días antes, y encontró lo que necesitaba para reproducir el experimento. Pero aquello resultó más difícil de lo esperado: no lo consiguió hasta el mes de agosto, tras unir fuerzas con un grupo de la Universidad de Columbia liderado por su amigo Cory Dean. «Nosotros lo habíamos replicado muchas veces», afirma Jarillo-Herrero. Pero tener la confirmación de un segundo grupo les dio «una tranquilidad tremenda», reconoce.

Aunque la colaboración de Young y Dean fue la primera que dio a conocer sus intentos de replicación, Lau recuerda que la actividad entre bambalinas era frenética. «No había visto tanta agitación en el campo del grafeno desde su descubrimiento», añade. Entretanto, otros tres equipos informaron de que habían sido capaces de comprobar una parte o la mayoría de los resultados del grupo del MIT, aunque no todos revelaron con qué otros materiales bidimensionales y configuraciones estaban experimentando. «Todo el mundo está tomando sus materiales favoritos y rotándolos entre sí», asegura Young. Por su parte, los teóricos interesados en explicar el fenómeno han publicado desde entonces un centenar largo de artículos en el repositorio arXiv. Pero Lau opina que aún queda un largo camino por recorrer hasta entender si el grafeno muestra el mismo mecanismo que subyace a la superconductividad de altas temperaturas. «Hasta ahora, aparte del hecho de que se trata de un sistema verdaderamente interesante, no creo que los teóricos coincidan en nada», aduce la investigadora.

Elizabeth Gibney es periodista de la revista *Nature*.



ÁNGULO MÁGICO

Los asistentes a la charla de Jarillo-Herrero en Los Ángeles estaban entusiasmados, pero también se mostraban escépticos. Ironizaron con el hecho de que la última persona que había presentado algo tan espectacular fue Jan Hendrik Schön, cuyos deslumbrantes hallazgos sobre superconductividad y otros fenómenos, publicados en los años 2000 y 2001, acabaron resultando un tremendo fraude. «Estaban bromeando», aclara Jarillo-Herrero. «Pero dijeron que tenían que verlo reproducido para creerlo.»

Si bien la superconductividad en capas de grafeno rotadas apareció de improviso, la idea de que algo intrigante podía ocurrir ya estaba en el ambiente. Al superponer dos láminas de grafeno y rotar una con respecto a otra un ángulo de varios grados, las capas suelen comportarse de manera independiente. Pero, a ángulos menores, las dos redes desalineadas pueden dar lugar a una «superred»: una en la que los electrones tienen libertad para moverse entre las capas. Los teóricos habían predicho que, a ciertos ángulos pequeños, conocidos como «ángulos mágicos», la estructura subyacente de la superred alteraría el comportamiento de los electrones, frenándolos y permitiéndoles interaccionar de tal modo que las propiedades electrónicas del material acabarían modificándose. Sin embargo, nadie sabía qué cambios se producirían en el material ni a qué ángulo específico aparecerían estos.

En 2010, Eva Andrei, física de la Universidad Rugers, y sus colaboradores captaron indicios de comportamientos extraños en el grafeno con ángulos cercanos al valor que más tarde referirían Jarillo-Herrero y su equipo. Sin embargo, muchos dudaron de que la teoría funcionara. «No me lo creía», reconoce Philip Kim, físico experimental en Harvard, «pero admito que estaba completamente equivocado».

Cuando Young volvió a su laboratorio en marzo, imaginaba que reproducir los resultados del grupo del MIT sería trivial.

EN SÍNTESIS

El año pasado, un grupo del Instituto de Tecnología de Massachusetts demostró que, al superponer dos capas de grafeno y rotarlas entre sí un pequeño ángulo, el sistema podía tornarse superconductor.

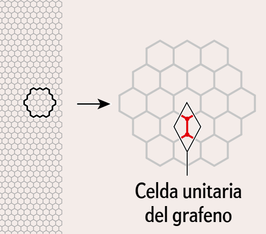
Más aún, la superconductividad observada en el grafeno no parece ser del mismo tipo que la tradicional. Muchos físicos creen que, de ser el caso, ello podría abrir la puerta a entender los superconductores de alta temperatura.

El descubrimiento ha sido recibido con la publicación de una riada de artículos que han intentado explicar el fenómeno. No obstante, aún serán necesarios más experimentos para determinar el verdadero significado del hallazgo.

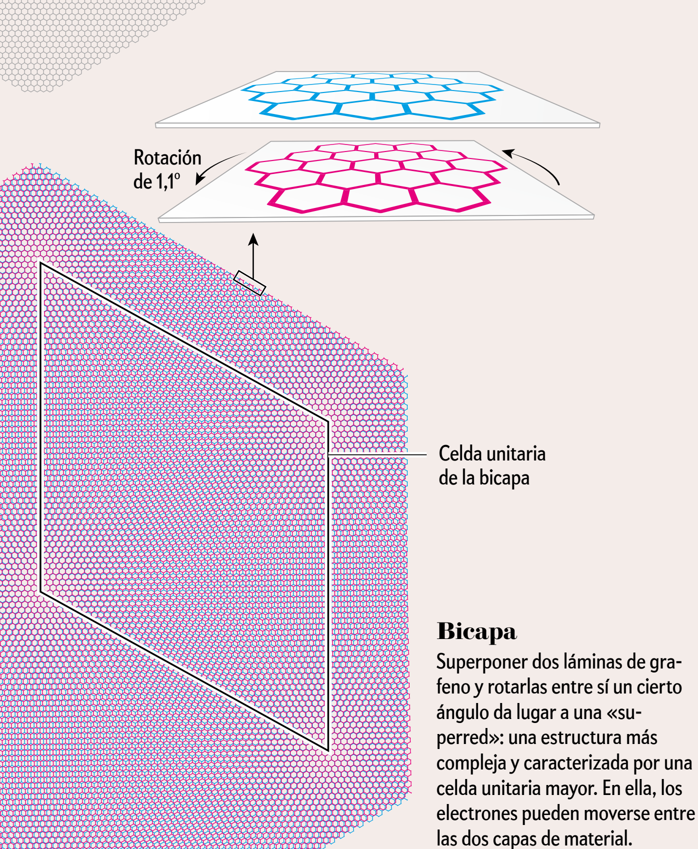
PÁGINAS ANTERIORES: JULIETTE HALSEY, *NATURE*

Ángulo mágico

El grafeno es un material formado por láminas de carbono de un único átomo de espesor. En cada capa, los átomos se disponen formando una red hexagonal (*arriba*). Un trabajo reciente ha hallado que, al apilar una lámina de grafeno sobre otra y rotarlas un ángulo relativo de 1,1 grados (*abajo*), el material presenta propiedades superconductoras.



Capa simple
La estructura cristalina de una sola capa de grafeno puede describirse a partir de la repetición de un patrón básico, su «celda unitaria».



Bicapa
Superponer dos láminas de grafeno y rotarlas entre sí un cierto ángulo da lugar a una «superred»: una estructura más compleja y caracterizada por una celda unitaria mayor. En ella, los electrones pueden moverse entre las dos capas de material.

Cuando el ángulo de rotación alcanza un valor específico, las propiedades electrónicas del material se modifican de manera drástica. Con un ángulo de 1,1 grados, a bajas temperaturas y en presencia de un campo eléctrico, la muestra se torna superconductora.

Su equipo disponía de los medios necesarios para alcanzar las temperaturas ultrabajas requeridas, y los investigadores ya eran expertos en preparar muestras extremadamente limpias. Sin embargo, conseguir que las láminas de grafeno se alinearan en el ángulo correcto, cercano a los 1,1 grados, costó más de lo previsto. Atinar con el ángulo es complicado, ya que puede depender de cómo se hayan obtenido las muestras. Además, puesto que la estructura del grafeno rotado es similar a la del grafito, en el que sucesivas capas se orientan en la misma dirección, la mínima cantidad de calor o tensión puede inducir su alineamiento. «Es como si no quisieran quedarse quietas donde uno las pone», señala Young.

El laboratorio de Dean, que también investigaba el problema, dio con una solución: si en ciertos montajes se rebasaba el ángulo, parte de las muestras quedaban fijadas en el ángulo mágico cuando intentaban regresar a la posición de alineamiento. Sin embargo, para que se tornasen superconductoras, había que reducir la temperatura hasta valores muy cercanos al cero absoluto, para lo cual se necesitaba un equipamiento del que el laboratorio carecía. Al colaborar con el grupo de Young, los investigadores pronto obtuvieron varios montajes en los que la resistencia (una propiedad característica de un aislante) se disparaba, pero en los que caía a cero cuando añadían electrones libres a la muestra mediante la aplicación de un campo eléctrico.

SUPERCONDUCTIVIDAD EXÓTICA

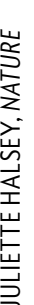
Una de las razones del interés que despiertan las bicapas de grafeno giradas radica en las fuertes similitudes entre su comportamiento y el de los superconductores no tradicionales. En muchos de estos, la corriente eléctrica fluye sin resistencia a temperaturas superiores a las que generalmente predice la teoría al uso de la superconductividad. Sin embargo, el modo en que eso sucede continúa siendo un misterio: uno que, cuando se resuelva, podría abrir las puertas a diseñar materiales que conduzcan la electricidad sin resistencia a casi temperatura ambiente. Ello facultaría un transporte de electricidad mucho más eficiente y, al recortar el gasto en energía, repercutiría en todo tipo de técnicas.

Todas las formas de superconductividad tienen lugar cuando los electrones de un material se agrupan en pares, lo que a la postre les permite fluir sin resistencia. En los superconductores tradicionales, los electrones se emparejan de manera indirecta, como consecuencia de su interacción con las vibraciones de la red cristalina. Sin embargo, existe otro tipo de superconductores —muchos de los cuales permiten transportar electricidad sin pérdidas a temperaturas de hasta 140 kelvins (unos 130 grados Celsius bajo cero)— en los que los electrones parecen aparearse mediante una interacción directa y mucho más intensa.

Los experimentos del MIT mostraban indicios de esta superconductividad no tradicional. Aunque las bicapas de grafeno rotadas solo exhiban superconductividad a temperaturas extremadamente bajas, son muy pocos los electrones que se mueven con libertad. Ello sugiere que, a diferencia del caso habitual, sea cual sea la interacción entre los electrones, esta debería ser relativamente intensa. Además, la proximidad del estado superconductor a uno aislante remeda lo observado en los cupratos, un grupo de superconductores de alta temperatura. En estos, el estado de resistencia cero a menudo bordea otro conocido como «aislante de Mott», en el que la corriente no fluye a pesar de haber electrones libres, ya que la repulsión entre ellos los mantiene en posiciones fijas [*véase* «¿Aislante o metal?»,



EL FÍSICO VALENCIANO Pablo Jarillo-Herrero (*izquierda*) con tres estudiantes de posgrado en su laboratorio del Instituto de Tecnología de Massachusetts. El año pasado, su grupo demostró la posibilidad de inducir propiedades superconductoras en el grafeno.



por Arantzazu Mascaraque y Antonio Tejeda; Investigación y Ciencia, marzo de 2011].

La confirmación de que las bicapas de grafeno rotadas se rigen por los mismos mecanismos supondría una bendición para los teóricos. Ello se debe a que uno de los problemas de los cupratos, como el óxido de itrio, bario y cobre, radica en que están formados por una amalgama de elementos que resulta difícil de modelizar. «La esperanza es encontrar la misma fenomenología pero en un sistema mucho más simple, al que los teóricos puedan hincarle el diente y lograr algún progreso», señala Andrei.

El grafeno es también el sueño de los físicos experimentales. Estudiar la transición al estado superconductor significa medir lo que sucede conforme se añaden electrones libres al material. En los cupratos, esto se consigue introduciendo átomos de un elemento distinto (un proceso conocido como «dopaje»), lo que implica crear una muestra completamente nueva. En las bicapas de grafeno rotadas, sin embargo, los investigadores pueden efectuar la transición sin más que regular el voltaje, explica Andrei. «Eso supone una ventaja enorme.»

Nadie sabe todavía si el grafeno actúa en realidad como un superconductor no tradicional, y ni siquiera si su comportamiento obedece a las condiciones descritas por la teoría del ángulo mágico. La avalancha de artículos teóricos publicados desde marzo del año pasado cubre todas las posibilidades. Dado que los sistemas fuertemente correlacionados resultan demasiado complejos de tratar en su totalidad, los teóricos usan aproximaciones distintas en cada modelo. Ello da lugar a algunas teorías tan flexibles que siempre es posible modificarlas para hacer encajar los nuevos datos, apunta Young. Pocas explican por completo todos los hallazgos, y muchas no incluyen predicciones que permitan a los físicos experimentales discriminar entre las distintas posibilidades, añade Jarillo-Herrero. «Para un experimental como yo, todas parecen igual de sensatas. En el terreno teórico me encuentro un poco desorientado», reconoce.

Por el momento, existen indicios de que el grafeno podría presentar tanto una superconductividad al uso como una no tradicional. Algunos datos del grupo del MIT sugieren la existencia de otros fenómenos característicos de los superconductores exóticos, afirma Jarillo-Herrero. Para empezar, su equipo ha advertido que la intensidad del campo magnético necesaria para anular la superconductividad de la muestra —un proceso debido al fenómeno conocido como «efecto Meissner»— varía con la dirección, si bien en un superconductor tradicional no debería ocurrir así.

RESULTADOS DIVERGENTES

Con todo, los hallazgos de los grupos de Young y Dean invitan a la cautela. Sus muestras son más uniformes que las del MIT, asegura Young, pero presentan algunos resultados contradictorios. En concreto, la dependencia de la fase superconductora con el número de electrones libres presenta una asimetría que concuerda más con el mecanismo tradicional. Y, al contrario que los cupratos, que pueden ser aislantes a temperaturas mayores que aquellas a las que superconducen, en las bicapas de grafeno rotadas ambos estados parecen existir en un intervalo similar de temperaturas.

Young opina que para clarificar la situación hacen falta más experimentos; por ejemplo, para comprobar si el estado superconductor persiste cuando se restringen las vibraciones en la muestra al tiempo que se siguen permitiendo las interacciones electrónicas. El grupo de Andrei trabaja para generar imágenes del material a escala atómica, lo que podría revelar efectos inapreciables cuando la muestra se estudia como un todo. Según Andrei, algunos datos preliminares de su grupo podrían ayudar a dar sentido a la física subyacente.

Explicar los resultados experimentales —aparte de diseñar montajes que funcionen bien en otros materiales bidimensionales— plantea todo un desafío. Young explica que, dado lo delicado del sistema, incluso el material empleado en los electrodos puede interferir en los resultados: «Hay que interpretar con cuidado lo que vemos, ya que ignoramos cuáles son propiedades intrínsecas del sistema y cuáles se deben al montaje experimental». Según Young, el mecanismo tras la superconductividad en el grafeno bien podría ser el tradicional. Pero, aun así, seguiría siendo interesante incluso cuando no ayudase a explicar la superconductividad a alta temperatura. «Ya se ha convertido en uno de los resultados más sensacionales del campo en la última década», sentencia.

Con independencia de que muestre o no signos de una forma exótica de superconductividad, los investigadores consideran el fenómeno fascinante, ya que constituye un raro ejemplo de un cambio drástico provocado por una pequeña perturbación. «Eso por sí solo ya es sorprendente y notable», dice Dean. «¿Qué tiene este sistema que da lugar a una superconductividad que no aparece cuando nos desviamos del ángulo de rotación preciso?»

Ocurra lo que ocurra en el estado superconductor, los físicos coinciden en que el estado aislante que lo acompaña es casi imposible de explicar sin alguna clase de interacción entre los electrones. Al igual que ocurre en un metal, el grafeno conduce la electricidad gracias a electrones libres, que solo interaccionan con la red atómica y no entre sí. De algún modo, pese a la exis-

tencia estos electrones libres, ausentes en los aislantes ordinarios, una bicapa de grafeno puede bloquear el flujo de corriente, lo que sugiere la existencia de interacciones electrónicas.

La fascinación se debe a que tales interacciones subyacen a muchos de los asombrosos estados de la materia descubiertos en los últimos decenios. Entre ellos se incluyen los líquidos de espín cuánticos (extraños estados desordenados en los que los campos magnéticos de los electrones nunca se alinean) y los estados de Hall cuánticos fraccionarios (que dan lugar a fases de la materia definidas por propiedades topológicas). «Es en los sistemas fuertemente correlacionados donde radican muchas de las grandes preguntas, y quizá también muchas de las grandes oportunidades, de la física de la materia condensada», sostiene Young. Buena parte de esos estados emergen en condiciones que, al menos en lo que respecta a los electrones, parecen similares a las que presenta el grafeno con ángulo mágico. Eso abre la puerta a que puedan observarse otros estados intrigantes en bicapas rotadas, aventura Rebeca Ribeiro-Palau, física del Centro de Nanociencia y Nanotecnología de Palaiseau, cerca de París, que hizo un posdoctorado en el laboratorio de Dean. «Para mí, la presencia de un estado superconductor es síntoma de que hay algo más interesante», subraya.

Un aspecto clave reside en que el grafeno y otros sistemas bidimensionales permiten un control experimental mucho mayor que otros materiales fuertemente correlacionados, añade la experta. En ellos es posible ajustar con facilidad no solo el campo eléctrico, sino también el ángulo de rotación. Y, como demostró la colaboración entre Young y Dean, los investigadores pueden también afinar la distancia entre las capas aplicando presión. Cuando estas se acercan, aumenta la interacción entre los electrones de las láminas, lo que implica que las condiciones de ángulo mágico pueden ocurrir a rotaciones más amplias y, en consecuencia, más estables.

MÁS ALLÁ DEL GRAFENO

Kim explica que él y sus colaboradores ya han reproducido el hallazgo del grafeno. Ahora intentan ver si también pueden generar superconductividad, o tal vez magnetismo, en capas rotadas de ciertos semiconductores bidimensionales más complejos, los llamados dicalcogenuros de metales de transición. Antes del resultado de Jarillo-Herrero y su grupo, el equipo de Kim era uno de los pocos que investigaba los efectos de rotar una capa bidimensional sobre otra: una incipiente área de investigación que algunos han bautizado como «girotrónica» (*twistronics*). Tras los resultados obtenidos con el grafeno, la idea comienza a despegar. «En principio, el mismo concepto puede aplicarse a todos los materiales bidimensionales: se trata de rotarlos y ver qué ocurre», apunta Kim. «Cabe la posibilidad de hallar algo completamente inesperado.»

Entretanto, Feng Wang, de la Universidad de California en Berkeley, asegura que él y sus colaboradores han observado signos de superconductividad en apilamientos de tres capas de grafeno incluso sin rotar. Al superponer tres láminas de cierta manera, se consigue una geometría similar a la de las bicapas con ángulo mágico, lo que deriva en sistemas fuertemente correlacionados, afirma.

Los físicos se muestran optimistas. Creen que la unión de dos campos de investigación dispares —los materiales bidimensionales y los sistemas fuertemente correlacionados— producirá resultados fascinantes. «Nos brinda la oportunidad de hablar a una comunidad entera con la que no hemos podido comunicarnos en el pasado», augura Dean. Y los físicos aplicados piensan en cómo podrían aprovecharse las inusuales propiedades de las bicapas rotadas para almacenar y procesar información de forma mucho más eficiente. La rotación y la compresión de materiales podrían también dar lugar a nuevas formas de alterar el comportamiento de un dispositivo electrónico.

Por ahora, sin embargo, numerosos investigadores dedican sus esfuerzos a desentrañar los principios básicos. A principios de este año, físicos teóricos y experimentales se citaron en el Instituto Kavli de Física Teórica en Santa Bárbara para discutir largo y tendido sobre los fundamentos de este floreciente campo. Jarillo-Herrero espera que tales reuniones contribuyan a acercar posturas entre los teóricos. «Por ahora, ni siquiera se ponen de acuerdo en lo básico», señala. Y añade que los físicos experimentales tal vez comiencen a mostrarse más dispuestos a abrir su mano y hacer públicos sus datos.

Aunque por ahora se ignore la importancia que a la larga tendrá este descubrimiento, Young cree que puede extraerse una moraleja de las docenas de artículos teóricos que han aparecido desde el trabajo de Jarillo-Herrero y su grupo: «Puede salir cualquier cosa de aquí, pero no cabe duda de que algo saldrá».

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 565, págs. 15-18, 2019.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2019

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Observation of Van Hove singularities in twisted graphene layers. Guohong Li et al. en *Nature Physics*, vol. 6, págs. 109-113, febrero de 2010.
Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices. Yuan Cao et al en *Nature*, vol. 556, págs. 43-50, abril de 2018.
Twistable electronics with dynamically rotatable heterostructures. Rebeca Ribeiro-Palau et al. en *Science*, vol. 361, págs. 690-693, agosto de 2018.
Gate-tunable topological flat bands in trilayer graphene boron-nitride Moiré superlattices. Bheema Lingam Chittari et al. en *Physical Review Letters*, vol. 122, art. 016401, enero de 2019.
Tuning superconductivity in twisted bilayer graphene. Matthew Yankowitz et al. en *Science*, vol. 363, págs. 1059-1064, marzo de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Grafeno. André K. Geim y Philip Kim en *IyC*, junio de 2008.
Claves de la superconductividad a altas temperaturas. Graham P. Collins en *IyC*, octubre de 2009.
Electrónica del grafeno. José González Carmona, M.ª Ángeles Vozmediano y Francisco Guinea en *IyC*, septiembre de 2010.
Viaje a un universo de dos dimensiones. José J. Baldoví y Ángel Rubio en *IyC*, septiembre de 2018.

José Manuel Sánchez Ron es miembro de la Real Academia Española y catedrático de historia de la ciencia en el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid.



HISTORIA DE LA BIOLOGÍA

Entre Darwin y Huxley

Sobre cómo fue recibida la teoría de la evolución de las especies

José Manuel Sánchez Ron

PARA COMPRENDER CABALMENTE EL DESARROLLO DE LA CIENCIA ES PRECISO AHONDAR en diferentes apartados. Hay que ocuparse, por supuesto, de los científicos que participaron en el asunto del que se trate y de cuáles fueron sus aportaciones, teóricas o experimentales (en cuyo caso habrá que estudiar los instrumentos que utilizaron). También hay que fijarse en cómo llegaron a ellas, lo que conlleva indagar en la historia anterior, esto es, en sus precursores —si los hubo— y en los investigadores de su tiempo con los que se relacionaban. Es necesario, asimismo, reparar en las instituciones a las que estuvieron vinculados. Y, dado que las aportaciones dependen también del modo en que son recibidas, no se debe pasar por alto la acogida que tuvieron.

Por sus implicaciones sociales y religiosas, un caso particularmente interesante en ese sentido es el del libro (puesto a la venta el 24 de noviembre de 1859) en el que Charles Darwin presentó su teoría de la evolución de las especies: *On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life* («Sobre el origen de las especies por medio de la selección natural, o la preservación de especies favorecidas en la lucha por la vida»).

La aparición de esta obra suscitó de inmediato grandes pasiones, en las que los argumentos científicos se mezclaban con consideraciones de índole religiosa o, incluso, política. Abundan los ejemplos y los protagonistas de tales discusiones tempranas. Entre los principales opositores recordaré a Richard Owen, especialista en anatomía comparada que había ayudado a Darwin en la clasificación de los fósiles que trajo de su viaje de cinco años en el *Beagle*; el zoólogo y geólogo suizo afincado en Estados Unidos Louis Agassiz, y dos viejos conocidos de Darwin: el geólogo Adam Sedgwick, que fue profesor suyo en Cambridge, y Robert FitzRoy, el capitán del *Beagle*. Aunque se esgrimían razones científicas, con frecuencia se insistía en (o subyacían con fuerza) los argumentos teológico-religiosos.

Pero hubo un acontecimiento particularmente notorio: el célebre, casi mítico, debate que tuvo lugar en Oxford el sábado 30 de junio de 1860, durante una de las sesiones de la reunión anual, a la que asistían siempre cientos de personas, científicos al igual que ciudadanos interesados en la ciencia, de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia. (Esta organización había sido establecida en 1831 siguiendo el modelo de la Sociedad Alemana de Ciencias Naturales y Medicina, fundada en 1822 en Leipzig a instancias sobre todo del biólogo Lorenz Oken. Más tarde llegaron otras similares, como la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia en 1848, la Sociedad



THOMAS HENRY HUXLEY (1825-1895).
Fotografía de W. & D. Downey.

Italiana para el Progreso de la Ciencia en 1907 y la Asociación Española para el Progreso de las Ciencias en 1908.) En aquella ocasión se enfrentaron el obispo de Oxford, Samuel Wilberforce (1805-1873), y Thomas Henry Huxley (1825-1895).

Thomas Henry Huxley

Especialista en anatomía comparada y paleontología, Huxley había conocido a Darwin en 1851. Aunque al principio no agradó particularmente a este —le pareció demasiado crítico, agrio y brillante—, pronto comenzaron a cartearse con frecuencia. Además, Darwin reconoció en el informado, agudo y bien relacionado Huxley un excelente crítico para reseñar sus libros. Así, el 11 de abril de 1853 le escribía:

Hablaba usted como si hubiera tenido intención de reseñar mis Cirrípedos *[se refería aquí a* A monograph of the subclass Cirripedia, vol. 1, The Lepadidae*, publicado en 1851]: es muy indecoroso por mi parte decirlo así, pero me causaría gran placer ver mi trabajo revisado por alguien tan capaz como usted de encomiar todo lo que puede merecer alabanza, y criticar los errores que sin duda contiene. Mi principal razón para desearlo es que, de lo contrario, creo que ningún extranjero conocerá su existencia. Lleva un año publicado y ningún zoólogo ha tomado nota de ella, excepto, brevemente, Dana [James Dwight Dana, geólogo y zoólogo estadounidense, editor del* American Journal of Science and Arts *desde 1846 y a partir de 1856 catedrático de geología en la Universidad Yale].*

Huxley ha sido denominado, con razón, «el bulldog de Darwin», por la energía y habilidad que desplegó en defensa de la teoría darwiniana. Conocemos la impresión que la lectura de *The origin of species* produjo en Huxley gracias a una carta que este envió a Darwin el 23 de noviembre, esto es, el día antes de que el libro apareciese en las librerías —como a otros colegas cuya opinión e influencia valoraba, Darwin le había enviado un ejemplar; se sabe que fueron al menos 47 (entre ellos Louis Agassiz, Robert FitzRoy, Asa Gray, John Henslow, John Herschel, Joseph Hooker, Charles Lyell, Richard Owen, Adam Sedwick, Herbert Spencer y Alfred Russel Wallace) los que recibieron uno de estos ejemplares por cortesía del autor:

Mi querido Darwin, he terminado su libro ayer; su lectura me ha proporcionado unas pocas horas de placer continuo. Desde que leí los ensayos de Von Bär [Ernst von Baer], hace nueve años, ningún trabajo en la ciencia de la historia natural que haya encontrado me ha producido una impresión mayor, y le felicito de todo corazón por la gran cantidad de nuevas perspectivas que me ha proporcionado. Nada, pienso, puede ser mejor que el tono del libro; impresiona a aquellos que conocen el tema. Con respecto a su doctrina, estoy dispuesto a ir la hoguera, si es necesario, para apoyar el capítulo IX [«La imperfección del registro geológico»] y la mayor parte de los capítulos X [«La sucesión geológica de los seres orgánicos»], XI-XII [«Distribución geográfica»], y el capítulo XIII [«Clasificación, morfología, embriología y órganos rudimentarios»]. Gran parte del contenido es admirable, pero en uno o dos puntos hago una advertencia hasta que pueda ver todos los lados de la cuestión.

Con respecto a los primeros cuatro capítulos [«Variación en estado doméstico», «Variación en la naturaleza», «Lucha por la existencia» y «Acción de la selección natural»], estoy de acuerdo completa y profundamente en los principios que presenta en ellos. Creo que ha demostrado una causa verdadera para la producción de especies, y son sus adversarios quienes deben ocuparse del onus probandi *[«carga de la prueba»], esto es, de demostrar que las especies no aparecen en la forma que usted supone.*

Pero siento que todavía no he comprendido completamente las implicaciones de esos muy notables y originales capítulos III, IV y V [«Leyes de la variación»], y no escribiré ahora nada más acerca de ellos.

Las únicas objeciones que se me han ocurrido son: primero, que se ha cargado usted con una dificultad innecesaria al adoptar de manera tan firme el Natura non facit saltum *[«La naturaleza no da saltos»]; y segundo, no veo claro por qué, si las condiciones físicas que se mantienen constantes tienen tan poca importancia como usted supone, debe producirse la variación.*

No obstante, debo leer el libro dos o tres veces más antes de suponer que comienzo a encontrar agujeros en él.

Confío en que no se permitirá disgustarse en modo alguno por el considerable abuso y malinterpretaciones que, a menos que yo esté muy equivocado, le esperan. Se ha ganado usted la gratitud permanente de todos los hombres juiciosos. Y en cuanto a las maldiciones que se ladrarán y gritarán, debe recordar que, de cualquier manera, algunos de sus amigos están provistos de una combatividad que (aunque a menudo usted ha reprochado) puede ser buena para usted. Yo estoy afilando mis garras y picos para tenerlos dispuestos.

Que tenía bien afiladas sus garras para defender a Darwin y su teoría es algo que se comprobó pronto, en la mencionada reunión de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia celebrada en Oxford entre el 27 de junio y el 4 de julio de 1860, en el espléndido Museo de Historia Natural inaugurado aquel mismo año.

La confrontación en Oxford

Existen varias descripciones de la confrontación que tuvo lugar entre el obispo Wilberforce y Huxley, pero desgraciadamente una carta que Huxley envió a Darwin con su versión no se ha conservado. En las voluminosas actas de la reunión publicadas (574 páginas), *Report of the thirtieth meeting of the British Association for the Advancement of Science* (John Murray, Londres 1861), aparecen solo resúmenes de dos intervenciones en las que se mencionó la teoría de Darwin: la de C. J. B. Daubeny, catedrático de botánica en Oxford («Remarks on the final causes of the sexuality of plants, with particular reference to Mr. Darwin's work "On the origin of species by natural selection"») y la del químico de origen británico instalado en Estados Unidos John William Draper («On the intellectual development of Europe, considered with reference to the views of Mr. Darwin and others, that the progression of organisms is determined by law»).

Una de las descripciones existentes es la del reverendo William H. Fremantle (1807-1861), que asistió a aquella sesión. Se reprodujo tanto en el libro que Francis Darwin compuso para recordar a su padre, *Charles Darwin: His life told in an autobiographical chapter, and in a selected series of his published letters* (1892), como en otro similar, *Life and letters of Thomas Hen-*

ry Huxley, editado por Leonard Huxley. «El obispo de Oxford —escribió Fremantle— atacó a Darwin, al principio de manera juguetona, pero después con inexorable formalidad [...] ¿Qué ha aportado [la teoría darwiniana]?», exclamó [...] Y entonces comenzó a burlarse: «Querría preguntar al profesor Huxley, que está sentado a mi lado, y está dispuesto a hacerme picadillo en cuanto me siente, acerca de su creencia de que desciende de un mono. ¿Procede esta ascendencia del lado de su abuelo o del de su abuela?» Y entonces, adoptando un tono más grave, afirmó, en una solemne perorata, que las ideas de Darwin eran contrarias a lo revelado por Dios en las Escrituras. El profesor Huxley no tenía ganas de responder; pero fue solicitado, y habló con su habitual penetración y con algo de desdén: «Estoy aquí solamente en interés de la ciencia», dijo, «y no he oído nada que pueda perjudicar los intereses de mi augusto defendido [...]». Por último, con relación a descender de un mono, dijo: «No sentiría ninguna vergüenza de haber surgido de semejante origen; pero sí que me avergonzaría proceder de alguien que prostituye los dones de cultura y elocuencia al servicio de los prejuicios y la falsedad».

Charles Lyell, el gran geólogo, autor del seminal *Principles of Geology* («*Principios de geología*»; 3 volúmenes, 1830-1833) que tanto influyó en Darwin —quien durante años se consideró geólogo más que naturalista— en la manera en que este leyó los sedimentos que albergaban los fósiles testigos de las formas de vida que habían existido en el pasado, también se refirió al debate entre Wilberforce y Huxley. Lo hizo en una carta que envió al botánico y paleobotánico Sir Charles Bunbury el 4 de julio. En ella, y después de señalar que aunque había estado en la reunión de Oxford y que no pudo asistir a la sesión en la sección de zoología y botánica en la que se produjo la discusión, había sabido de cómo se desarrolló esta, resumía lo que le dijeron de ella. Básicamente, coincidía con la versión de Fremantle, pero añadía un comentario:

Muchos culparon a Huxley por su irreverente libertad; pero todavía más, aquellos a los que escuché hablar del enfrentamiento, y entre ellos Hugh Falconer [paleontólogo y botánico], me aseguraron que el vicecanciller [de la Universidad de Oxford, Francis] Jeune (un liberal) manifestó que el obispo obtuvo nada más que lo que merecía. El obispo había sido muy aplaudido, pero antes de que la abarrotada sesión terminase (mucha gente no pudo entrar) estaban bastante inclinados hacia el otro lado.

Bastantes años después, el 27 de junio de 1891, el propio Huxley ofreció algunos detalles de su intercambio con Wilberforce en una carta que dirigió a Francis Darwin:

Debo decir que el relato de Fremantle es sustancialmente correcto [...].

La parte singular del asunto es que yo no habría estado presente excepto por Robert Chambers [editor, escritor y geólogo]. Había oído de la intención del obispo de utilizar la ocasión. Sabía que tenía la reputación de ser un polemista de primera clase, y yo era bastante consciente de que si él jugaba sus cartas propiamente, con semejante audiencia deberíamos tener pocas posibilidades de realizar una defensa eficaz. Más aún, yo estaba muy cansado y quería unirme a mi esposa, el sábado, en la casa de campo de su cuñado cerca de Reading. El viernes me encontré con Chambers en la calle y, en respuesta a algunos comentarios suyos referentes a que iba a la reunión, le dije que yo no tenía intención de asistir, que no veía ninguna razón en abandonar la paz y tranquilidad para ser golpeado episcopalmente. Chambers replicó con vehementes contrargumentos y dijo que yo los abandonaba. Entonces dije: «¡Oh!, si se lo va a tomar así, iré y tendré mi parte de lo que vaya a suceder».

De manera que fui, y, por casualidad, me senté cerca del viejo Sir Benjamin Brodie [notable cirujano]. El obispo comenzó su discurso, y para mi sorpresa, muy pronto demostró que era tan ignorante que no sabía cómo manejar su propio caso. Mi espíritu se animó proporcionalmente y cuando se volvió hacia mí con su insolente pregunta, le dije por lo bajo a Sir Benjamin: «El Señor lo ha puesto en mis manos».

Ese sagaz viejo gentleman *me miró como si yo hubiese perdido los nervios. Pero, de hecho, el obispo había justificado mi réplica más severa, y me preparé para que la tuviese. Fui cuidadoso, sin embargo, en no levantarme para responder hasta que los asistentes me lo pidieran. Entonces, me dejé llevar.*

Siendo justos con el obispo, debo confesar que no era malicioso y que fue siempre cortés cuando nos encontrábamos ocasionalmente en años posteriores. Hooker y yo abandonamos juntos la reunión, y recuerdo haberle dicho que esta experiencia había cambiado mi opinión acerca del valor práctico del arte de hablar en público, y que a partir de entonces lo cultivaría con cuidado y trataría de dejar de odiarlo. Hice aquello, pero nunca tuve éxito en dejar de odiarlo.

Así lo hizo, efectivamente. Y se convirtió en un hábil conferenciante y temido contrincante. Una de las tareas que asumió especialmente a partir de entonces fue la defensa de Darwin. Así, en una carta fechada el 21 de enero de 1860, Darwin escribía a Huxley:

He indicado a [John] Murray [el editor de sus obras] que le envíe un ejemplar de la segunda edición de mi libro. Debía haber hecho esto antes, ya que usted ha sido, por encima de cualquier otro o de casi cualquiera, el más cálido y el más importante defensor de él. lyC

PARA SABER MÁS

Life, letters and journals of Sir Charles Lyell, vol. II. Dirigido por K. M. Lyell. John Murray, Londres 1881.
Life and letters of Thomas Henry Huxley, vol. I. Leonard Huxley. MacMillan, Londres, 1900.
The correspondence of Charles Darwin, vol. 5 (1851–1855). Dirigido por Frederick Burkhardt y Sydney Smith. Cambridge University Press, Cambridge, 1989.
The correspondence of Charles Darwin, vol. 7 (1858-1859). Dirigido por Frederick Burkhardt y Sydney Smith. Cambridge University Press, Cambridge, 1991.
The correspondence of Charles Darwin, vol. 8 (1860). Frederick Burkhardt, Duncan M. Porter, Janet Browne y Marsha Richmond. Cambridge University Press, Cambridge, 1993.

EN NUESTRO ARCHIVO

El origen de la mente. *Darwin*. Barbara Continenza. Colección *TEMAS* de *lyC* n.º 54, 2008.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.



Cómo convertir un teléfono inteligente en un microscopio

Ya es posible efectuar observaciones microscópicas de calidad, y al alcance de todos los bolsillos, con un simple teléfono móvil

¿Hacer un examen microscópico de una gota de sangre en plena selva cuando se sospecha la existencia de un brote de malaria? Hasta hace muy poco algo así exigía un equipo costoso, voluminoso y frágil. Por fortuna, eso ha cambiado: hoy basta con un teléfono móvil y un dispositivo óptico pequeño y fácil de conseguir por relativamente poco dinero (gracias a una impresora 3D, por ejemplo) para fabricar un microscopio portátil de buena calidad y con la resolución necesaria.

Como la mayoría de los microorganismos, el parásito de la malaria tiene un tamaño del orden del micrómetro. Ello impide que lo podamos observar a simple vista: con una resolución angular del orden del minuto de arco, el ojo humano apenas puede distinguir detalles unos 50 micrómetros. Una lupa de diez aumentos tampoco bastará, por lo que habremos de procurarnos un instrumento óptico mejor.

Un microscopio óptico consta por lo general de un objetivo, el cual forma una imagen ampliada pero invertida del objeto, y un ocular, a través del cual observamos dicha imagen. Al combinar de esta manera dos lentes (o sistemas de lentes), pueden obtenerse con facilidad los aumentos necesarios (×100, ×400 o incluso más) para observar microorganismos.

Hoy los teléfonos móviles incluyen una cámara de buena calidad. ¿No bastaría con añadir un «objetivo» para convertirla en un microscopio? ¿Y no podríamos inspirarnos en Manu Prakash, el bioingeniero de Stanford que hace un tiempo popularizó un método para construir un microscopio con una pequeña bola de vidrio? [*Véase* «El pliegoscopio: un mi-

ILUSTRACIONES DE BRUNO VACARO

croscopio por menos de un euro», por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik; Investigación y Ciencia, enero de 2017.]

Combinar dos objetivos

Por desgracia, una de las dificultades de la microscopía reside en conseguir una buena resolución en un campo visual generoso. Ello exige corregir las aberraciones: tanto las cromáticas (debidas a la distinta refracción que experimenta la luz de colores diferentes) como las geométricas (causadas por los rayos que inciden demasiado inclinados en la superficie de una lente y que tornan borrosa la imagen). En concreto, este último punto dificulta trabajar con bolas de vidrio, ya que su zona de nitidez, próxima al eje óptico, es demasiado estrecha.

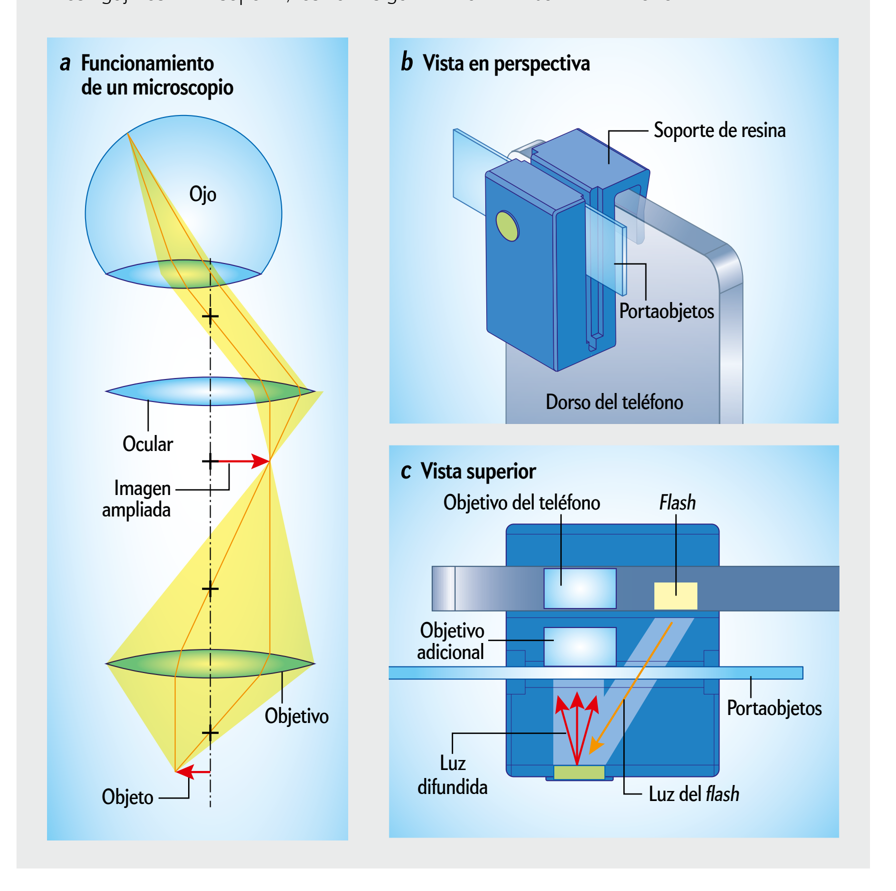
También es posible recurrir a un sistema de varias lentes; por ejemplo, colocando un conjunto objetivo-ocular delante del teléfono, que en tal caso hará las veces de ojo. Sin embargo, esta alternativa es cara, poco robusta y no aprovechará por completo el campo visual del teléfono, que puede llegar hasta los 60 grados. La imagen que obtendremos no ocupará toda la superficie abarcada por la cámara, ni, por tanto, toda la pantalla del teléfono.

En 2014, tres investigadores de la Universidad de California en Berkeley, Neil Switz, Michael d'Ambrosio y Daniel Fletcher, propusieron emplear un objetivo igual al de la cámara del teléfono pero colocado al revés. Dichos objetivos son más económicos, pues se producen en serie, y su campo visual puede aprovecharse por completo. Si ahora colocamos la muestra que deseamos observar en el plano focal del objetivo externo, obtendremos una imagen invertida y del mismo tamaño en el plano donde se forma la imagen del objetivo interno; es decir, en el sensor de la cámara. En ella no habremos generado ninguna ampliación. Sin embargo, debido al reducido tamaño de los píxeles del sensor, de unos 1,4 micrómetros, lograremos una resolución micrométrica.

Dado que la imagen se nos muestra sobre la pantalla del teléfono, que es mucho mayor que el sensor, la veremos ampliada. Con un IPhone 4S, por ejemplo, que cuenta con una pantalla de 33 centímetros cuadrados y un sensor de 16 milímetros cuadrados, obtendremos 14,4 aumentos. Sin embargo, como en la pantalla hay más píxeles (3264 × 2448) que en el sensor (960 × 640), podremos hacer *zoom* en la imagen. Gracias a ello, conseguiremos una ampliación de unos 60 aumentos.

UN TELÉFONO-MICROSCOPIO MÓVIL

UN MICROSCOPIO ÓPTICO necesita dos lentes (o sistemas de lentes): una como ocular y otra como objetivo (*a*). Un equivalente sencillo y económico puede obtenerse al combinar un teléfono inteligente con un objetivo idéntico al de la cámara del aparato. La imagen formada en el sensor de la cámara se verá entonces ampliada en la pantalla del dispositivo. Un soporte de resina obtenido mediante impresión 3D (*b*, *c*) permite acoplar todos los componentes. La correcta iluminación de la muestra se logra gracias a dos agujeros en el soporte, los cuales guían la luz del *flash* del teléfono.



También habremos de tener en cuenta la difracción de la luz, que en el sensor produce unas manchas algo mayores que un píxel. Al final, Switz y sus colaboradores consiguieron una resolución del orden de 5 micrómetros sobre un campo visual de 10 milímetros cuadrados.

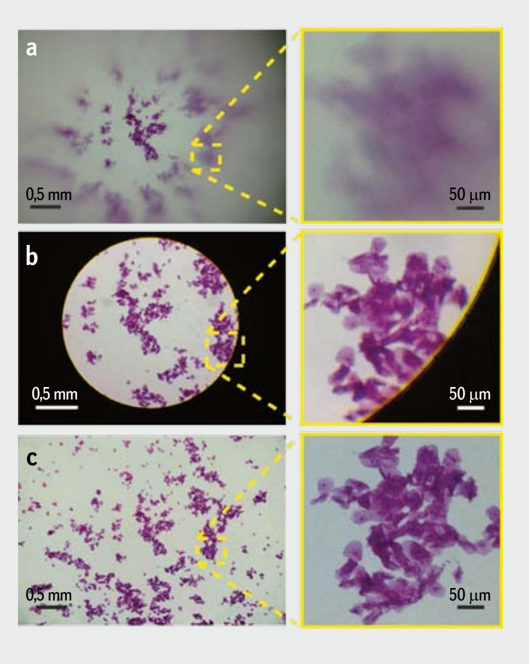
Iluminar bien la muestra

Pero emplear un objetivo idéntico al del teléfono no bastará. También habremos de colocar correctamente la muestra e iluminarla del modo adecuado. Para lo primero, las técnicas de impresión 3D han dado la vuelta a la situación, ya que, por un coste módico, permiten producir soportes en los que insertar el objetivo, el portaobjetos y el teléfono. Así pues, solo nos falta resolver el problema de la iluminación.

En microscopía óptica, la forma de iluminación más empleada es la de transmisión, en la que la luz atraviesa el objeto. Las razones para ello son múltiples y relacionadas con la necesidad de que llegue luz suficiente al ojo a pesar del aumento que experimenta la imagen, con el tamaño del sistema de iluminación y con el hecho de que el interior del objeto (células, pongamos por caso) nos interesa más que su superficie.

Hasta hace poco, en los microscopios construidos con un teléfono móvil se recurría a una fuente externa, como un led, cuya iluminación se conseguía uniformizar intercalando un filtro difusor en el camino óptico. Pero ¿es necesario añadir esto? El año pasado, Antony Orth y otros investigadores de las universidades australianas RMIT y de Adelaida demostraron que no.

IMÁGENES DE BUENA CALIDAD



LOS MICROSCOPIOS construidos con un teléfono inteligente y un objetivo idéntico al de su cámara permiten obtener imágenes de gran calidad (*c*), mejores que las que pueden obtenerse con un teléfono y una bola de vidrio (*a*) o un ocular y un objetivo (*b*). Estas fotografías de células epiteliales coloreadas muestran que el dispositivo con dos objetivos proporciona un campo visual más amplio y sin distorsiones.

Como alternativa, los autores propusieron usar el potente *flash* del que gozan la mayoría de los teléfonos móviles. Para ello es preciso hacer dos agujeros en el soporte, a fin de que guíen la luz desde el *flash* hasta una de sus paredes y de ahí al sensor a través de la muestra (*véase el recuadro* «Un teléfono-microscopio móvil»). De esta manera, el dispositivo no necesitará espejos ni otros accesorios y podrá construirse siempre en monobloque.

Sin duda, la resina negra de la que está hecho el soporte absorbe luz, pero aun así difunde la suficiente para iluminar la muestra. De los 45 milivatios nominales del *flash*, a la muestra solo llegan 2 microvatios. La atenuación es considerable, pero esa iluminación es la misma que recibiría la muestra si se encontrase a unos dos metros de distancia. Ello deja claro que se trata de una iluminación suficiente, que además evita la saturación del sensor de la cámara.

Al mismo tiempo, y gracias a la difusión de la luz, los rayos iluminan la muestra con inclinaciones muy variadas, lo que permite aprovechar bien la apertura del objetivo. Para ello, el tamaño de la superficie difusora y su distancia a la muestra deben elegirse de la manera adecuada.

Por último, este microscopio ambulante puede funcionar incluso con el *flash* apagado: aun en ausencia de iluminación directa, y al menos siempre que se den ciertas condiciones, es posible obtener imágenes. La luz ambiental puede reflejarse repetidamente en las caras del portaobjetos, que hace las veces de guía de luz, hasta que es difundida por la misma muestra. Gracias a los agujeros internos del soporte de resina, solo esa luz difundida atraviesa el objetivo y llega al sensor.

La imagen así obtenida se verá entonces sobre un fondo negro. Esto resultará especialmente útil si deseamos observar objetos casi transparentes, como ocurre con ciertos organismos acuáticos. Los investigadores australianos han demostrado que su microscopio móvil permite observar núcleos celulares, zooplancton o espermatozoides sobre un fondo negro o uno claro, según el caso. IyC

PARA SABER MÁS

Low-cost mobile phone microscopy with a reversed mobile phone camera lens. Neil Switz, Michael d'Ambrosio y Daniel Fletcher en *PLOS ONE*, vol. 9, art. e95330, mayo de 2014.

A dual-mode mobile phone microscope using the onboard camera flash and ambient light. Antony Orth et al. en *Scientific Reports*, vol. 8, art. 3298, febrero de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

El pliegoscopio: un microscopio por menos de un euro. Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik en *IyC*, enero de 2017.

por Bartolo Luque



Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid, donde investiga en teoría de sistemas complejos. Actualmente dirige la colección de libros *Grandes ideas de las matemáticas*, de Ediciones El País.

El juego del caos

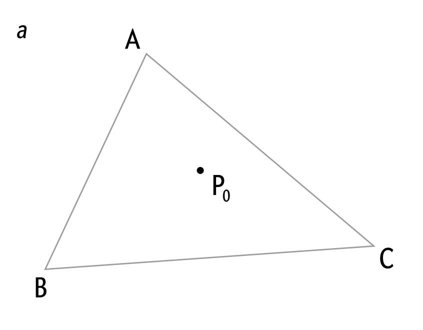
Un sorprendente método para generar fractales con aplicaciones en la compresión de imágenes

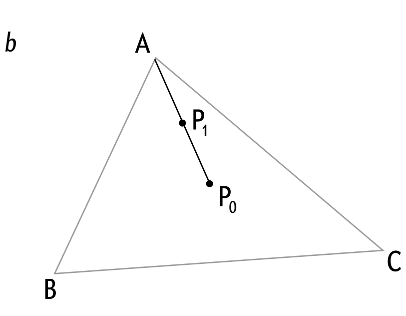
Consideremos el siguiente procedimiento geométrico: dibujemos los vértices A, B y C de un triángulo y escojamos al azar un punto cualquiera de su interior; por ejemplo, el punto P_0 de la figura 1a. Ahora, elijamos al azar uno de los tres vértices (en la figura 1b ha resultado ser A) y determinemos a partir de él un nuevo punto, P_1, que se encontrará a medio camino entre P_0 y A. Repitamos el proceso para P_1, escogiendo de nuevo al azar un vértice del triángulo (esta vez ha sido B, como muestra la figura 1c) y dibujemos P_2, el punto medio del segmento que une P_1 y B.

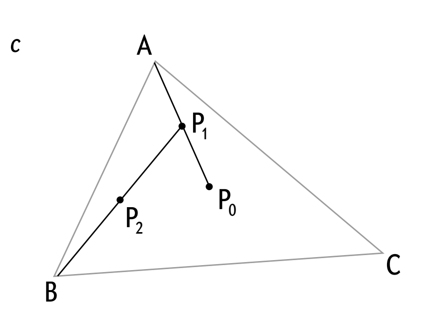
Si continuamos indefinidamente, generaremos una sucesión de puntos P_0, P_1, P_2, P_3... ¿Puede imaginar qué patrón resultará al pintarlos?

Dado que hemos empezado con un punto arbitrario y hemos escogido aleatoriamente los vértices en cada iteración, tal vez estemos tentados a pensar que el resultado será una distribución aleatoria de puntos sobre el triángulo que, con el tiempo, acabará llenándolo. Pero esa respuesta es incorrecta. Como el lector puede comprobar si entra en cualquiera de las páginas interactivas del juego que puede encontrar en Internet, el resultado es uno de los fractales más conocidos: ¡el triángulo de Sierpinski! (*véase la figura 2*).

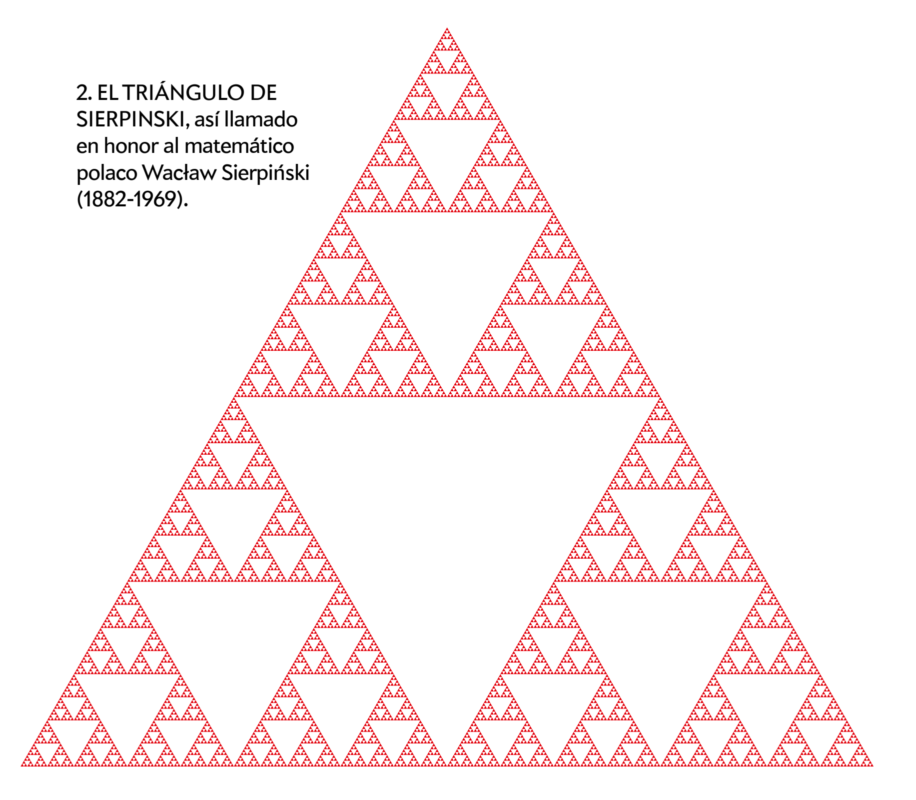
La iteración geométrica que hemos descrito es conocida como «juego del caos» y fue propuesta por el matemático británico Michael Barnsley en los años ochenta del siglo pasado como un método de generación de fractales a partir de los vértices de un polígono y un punto interior tomado al azar. Se trata de un sistema dinámico estocástico: a partir de un punto interior arbitrario, que actúa como condición inicial, las reglas del juego generan una sucesión de puntos, lo que en lenguaje matemático se conoce como una órbita. Con independencia de la condición inicial, la órbita acabará recorriendo todos los puntos del triángulo de Sierpinski, que actúa por tanto como «atractor» de la dinámica. ¿Cómo es posible?



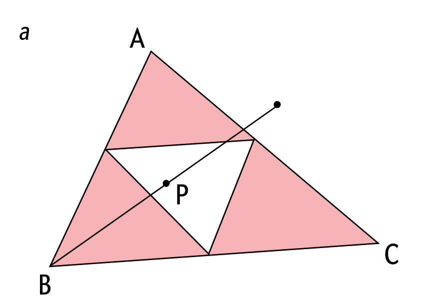


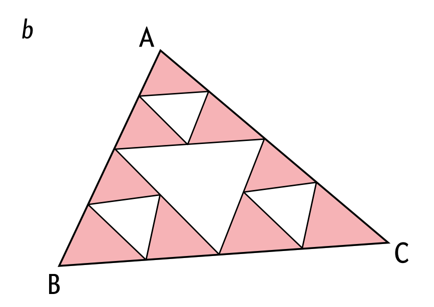


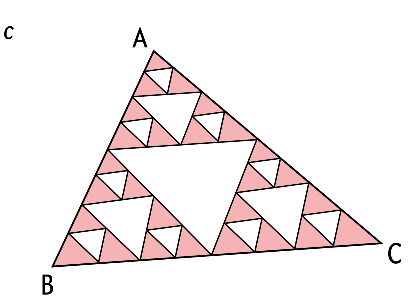
1. EJEMPLO de los primeros tres pasos (*a*, *b*, *c*) del juego del caos en un triángulo.



2. EL TRIÁNGULO DE SIERPINSKI, así llamado en honor al matemático polaco Wacław Sierpiński (1882-1969).







3. ELIMINACIÓN SUCESIVA de los puntos que pierden en uno (*a*), dos (*b*) y tres (*c*) pasos en el juego del caos inverso. En el límite, los puntos supervivientes (*rojo*) dan lugar a un triángulo de Sierpinski.

Fractales ocultos

Para entenderlo, consideremos una variante del juego con dos participantes. El jugador 1 escoge un punto inicial del interior del triángulo. Supongamos que se trata del punto P_2 de la figura 1c. Traza entonces un segmento que une dicho punto con el vértice más cercano (el segmento que une P_2 y B en 1c) y encuentra el punto simétrico de B con respecto a P_2. De esta manera llegará al punto P_1.

El jugador 1 itera este procedimiento, inverso al descrito para el juego del caos, y obtiene una sucesión de puntos: P_2, P_1, P_0, P_{-1}... Las reglas del juego dictan que dicha sucesión acabará en cuanto obtenga un punto fuera del triángulo. Después, el jugador 2 ejecutará la misma dinámica a partir de su libre elección de un punto inicial. Ganará aquel que consiga la sucesión con el mayor número de puntos.

Este proceso recorre en sentido inverso las órbitas generadas por el juego del caos. La pregunta es: ¿podemos escoger un punto inicial que nos proporcione una victoria segura? En otras palabras, ¿existen puntos cuyas órbitas nunca escapen del triángulo?

En la figura 3a hemos representado nuestro triángulo ABC con un triángulo interior de color blanco, el cual ha sido construido a partir de los puntos medios de los lados del triángulo inicial. Pensemos ahora en el punto P que se encuentra en el interior del triángulo blanco. Bajo las reglas del juego con dos participantes, P generará un punto que caerá fuera del triángulo. Una pequeña reflexión nos convencerá de que, de hecho, cualquier punto interior del triángulo blanco tendrá como sucesor uno que se sale del triángulo inicial.

Razonando hacia atrás, vemos que todos los puntos que en una sola jugada nos lleven a un punto del triángulo blanco serán puntos perdedores en dos pasos. ¿Cuáles son? De nuevo, una breve cavilación nos convencerá de que se trata de aquellos puntos pertenecientes a alguno de los tres nuevos triángulos blancos mostrados en la figura 3b, los cuales han sido construidos de manera análoga al primero. Si repetimos el razonamiento, veremos que los puntos que pierden en tres pasos son aquellos pertenecientes a los nueve triángulos de menor tamaño que muestra la figura 3c, construidos de idéntica forma que los anteriores.

Si continuamos indefinidamente, terminaremos eliminando todos los puntos cuyas órbitas acabarán en algún momento fuera del triángulo inicial: una tarea de recortes infinitos cuyas reglas coinciden con las usadas en la construcción clásica del triángulo de Sierpinski.

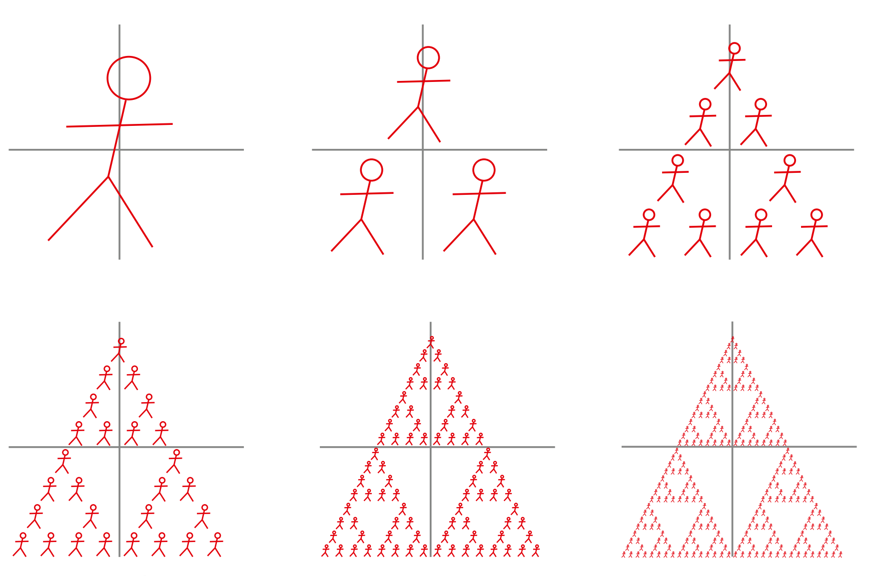
Funciones iteradas

El juego del caos en el triángulo puede generalizarse fácilmente a los vértices de un polígono cualquiera y a una fracción k (con $0 < k < 1$) de la distancia al vértice escogido al azar en cada iteración. En nuestro ejemplo, teníamos tres vértices y $k = 1/2$.

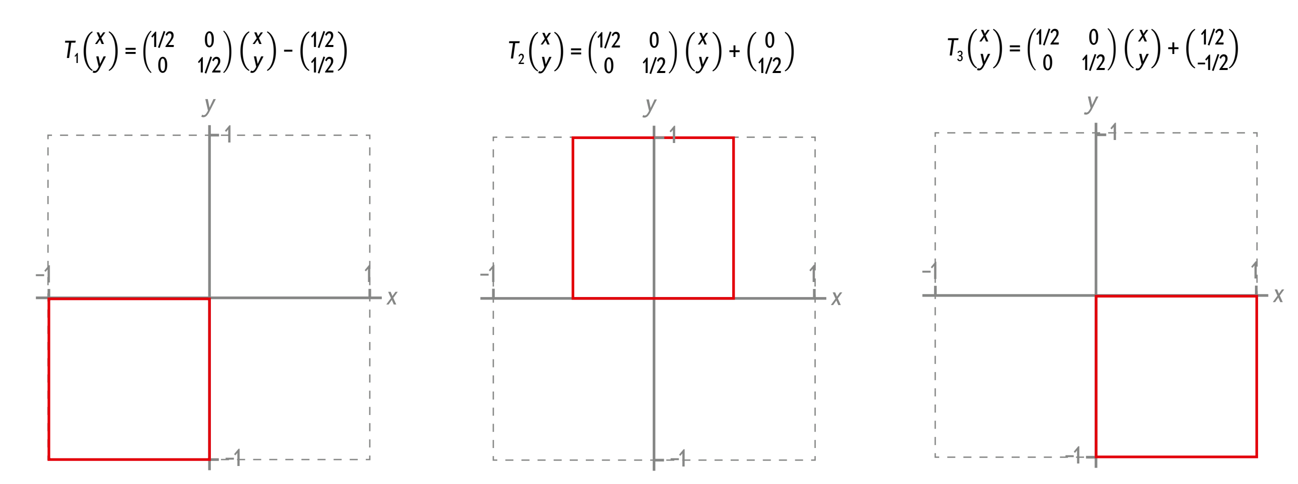
Este sencillo juego nos proporciona un ejemplo de un proceso dinámico estocástico que genera fractales. En los años ochenta del siglo pasado, Barnsley y el también matemático John E. Hutchinson desarrollaron una teoría general para este tipo de procesos, la cual concluyó con lo que hoy conocemos como sistemas de funciones iteradas.

Para explicar en qué consisten estos sistemas, apliquemos al monigote de la primera gráfica de la figura 4 una serie de transformaciones. Primero, crearemos tres copias del monigote reducidas a la mitad y las situaremos como se observa en la segunda gráfica. Al aplicar la misma transformación a este resultado, generaremos representaciones sucesivas que, como podemos ver fácilmente, acabarán convergiendo al triángulo de Sierpinski. Vemos que este actúa como un atractor de la dinámica: con independencia de la figura inicial, el resultado final será siempre ese fractal.

El tipo de transformaciones que hemos empleado pertenecen al conjunto de



4. APLICACIÓN ITERADA del conjunto de transformaciones que convergen al triángulo de Sierpinski. Con independencia de la figura inicial, el resultado será siempre el mismo fractal.



5. LAS TRES TRANSFORMACIONES AFINES que generan el triángulo de Sierpinski y su aplicación sobre un cuadrado inicial de lado 2 y centrado en el origen (*línea de puntos*).

transformaciones denominadas «afines», o de semejanza. En general, una transformación afín T de un punto (x, y) del plano consiste en multiplicar por una matriz y sumar un vector:

$$T\begin{pmatrix}x\\y\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}a & c\\b & d\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x\\y\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}e\\f\end{pmatrix},$$

donde a, b, c, d, e y f son constantes. Cuando aplicamos T a todos los puntos que componen una figura, el resultado será una versión deformada de dicha figura. Dependiendo de las entradas de la matriz, esta podrá corresponder a una dilatación o a una contracción de la imagen original, así como a una rotación, una reflexión o un cizallamiento. Por su parte, la suma del vector (e, f) no indica más que una simple traslación.

¿Qué transformaciones afines hemos aplicado a nuestro monigote de la figura 4 para acabar convergiendo al triángulo de Sierpinski? En la figura 5 podemos ver el resultado de las tres transformaciones implicadas cuando la figura inicial es un cuadrado con vértices en $(1, 1)$, $(-1, 1)$, $(-1, -1)$ y $(1, -1)$: tres contracciones a la mitad de tamaño más una traslación particular para cada una de ellas. Para continuar, aplicaríamos las mismas tres transformaciones a cada uno de esos cuadrados y así sucesivamente.

Compresión fractal

Vemos que nuestras transformaciones son contractivas: en el ejemplo anterior, hemos usado un factor de contracción $k = 1/2$. Parece que esto debería ser una condición necesaria para alcanzar un atractor. Sin embargo, hace poco que Barnsley y Andrew Vince demostraron que, bajo ciertas circunstancias, dicho requisito no resultaba imprescindible para converger a un atractor.

En general, por sistema de funciones iteradas entendemos un conjunto de transformaciones afines T_1, T_2 ... T_n contractivas en promedio. Matemáticamente, representamos la aplicación de las transformaciones sobre una imagen inicial I mediante el llamado «operador H de Hutchinson», que lo único que hace es aplicar cada una de las transformaciones a la imagen I para reunir luego todos los resultados en una sola imagen:

$$H(I) = T_1(I) \cup T_2(I) \cup ... \cup T_n(I) .$$

Si comenzamos con una imagen arbitraria, I_0, la primera aplicación del operador H nos devolverá

$$I_1 = H(I_0) .$$

La iteración de este proceso,

$$I_n = H(I_{n-1}) = H^n(I_0) ,$$

genera sucesivas imágenes que, en el límite cuando n tiende a infinito, alcanzan la imagen del atractor, I_∞, la cual corresponde a un «punto fijo» del operador:

$$I_\infty = H(I_\infty) .$$

Consideremos ahora el proceso inverso. Dada una imagen I_∞, ¿podemos encontrar el conjunto de transformaciones afines que nos llevarán a ella o, al menos, a una versión indistinguible a simple vista? En otras palabras: dado un atractor, ¿somos capaces de hallar el sistema de funciones iteradas que nos conduce hasta él?

Esta pregunta se conoce como «problema inverso» y tiene su enjundia, ya que, si pudiéramos encontrar una solución general, dispondríamos de un excelente método para comprimir imágenes. Si, dada una imagen, podemos determinar un sistema de funciones iteradas que la genera, bastará con que guardemos los parámetros del sistema de funciones para recuperar dicha imagen a partir de la iteración de una figura arbitraria. Y como el lector podrá adivinar, eso requiere muchísima menos memoria que almacenar la imagen en sí.

En los años ochenta, Barnsley halló un teorema hoy famoso, conocido como «teorema del *collage*», el cual proporcionaba una manera de determinar una cota superior a la diferencia entre la imagen que deseamos almacenar y el atractor que intenta remedarla. En 1992, su estudiante Arnaud Jacquin implementó el primer algoritmo automático de compresión fractal. Desde entonces, los algoritmos fractales se han refinado hasta convertirse en una herramienta de compresión más. Poco después, Jacquin encontró, bajo ciertas restricciones, una solución al problema inverso. Sin embargo, cuarenta años después de su planteamiento, la solución general sigue resistiéndose a los matemáticos. IyC

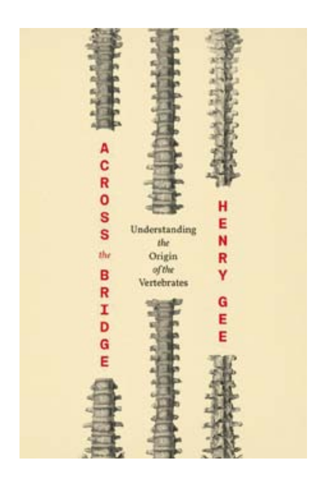
PARA SABER MÁS

Fractals everywhere. Michael F. Barnsley. Academic Press, 1993 (2.ª edición).

The chaos game on a general iterated function system. Michael F. Barnsley y Andrew Vince en *Ergodic Theory and Dynamical Systems*, vol. 31, págs. 1073-1079, agosto de 2011.

EN NUESTRO ARCHIVO

El lenguaje de los fractales. Hartmut Jürgens, Heinz-Otto Peitgen y Dietmar Saupe en *IyC*, octubre de 1990.



ACROSS THE BRIDGE
UNDERSTANDING THE ORIGIN OF THE VERTEBRATES

Henry Gee
The University of Chicago Press

El origen de los vertebrados

Certezas e incógnitas de un salto evolutivo confuso

La historia de la vida dista mucho de ser un campo cerrado, empezando por la cuestión recurrente de si nació aquí o provino de fuera. No solo aparecen propuestas sobre el tránsito de lo inerte a lo vivo, sino también sobre el origen de los grandes saltos, como el paso del mundo procariota al eucariota o el origen de los vertebrados. Las células eucariotas, que portan su ADN encerrado en un núcleo, se supone que evolucionaron a partir de la fusión de otros dos organismos: una arquea hospedadora y una bacteria. Además del núcleo, los eucariotas poseen otras características distintivas, como un sistema interno de membranas, un citoesqueleto y mitocondrias. Durante el Cámbrico, iniciado hace unos 540 millones de años, casi todos los grupos modernos, de moluscos a cordados, se habían iniciado ya y dejaron su impronta en el registro fósil. El propósito del libro de Henry Gee es presentar una síntesis accesible de los avances conseguidos en este campo.

Los vertebrados representan un grupo bastante pequeño del reino animal, aunque por su situación en la escala trófica desempeñan un papel clave para la vida en la Tierra. Algunas de las ideas aquí introducidas son objeto de controversia entre los expertos. Para el autor, por ejemplo, los fósiles del Cámbrico denominados vetulícolas y yunnanozoos constituirían parientes estrechos de los cordados, grupo extenso al que pertenecen los vertebrados. La sección segmentada del tronco de los cordados se originó, con los vetulícolas, separada por entero del resto del cuerpo y estaría destinada a convertirse en la cabeza y las vísceras.

Sin embargo, los vertebrados difieren tanto de otros animales que resulta muy difícil tender un puente que salve el hiato. Antes del advenimiento de las técnicas modernas de filogenia molecular y de medios objetivos para construir relaciones evolutivas, florecieron un sinfín de hipótesis, muchas de ellas aventuradas, sobre cómo los vertebrados emergerían de equinodermos, arañas, escorpiones, tunicados moluscos, nematodos, gusanos e incluso protozoos. Decepcionado por los textos de su tiempo, el autor publicó en 1996 un libro sobre los orígenes de los vertebrados bajo el título *Before the backbone*, donde realizaba un extenso repaso histórico sobre las distintas concepciones de la materia.

Por entonces acababan de descubrirse los genes *Hox*, cuya organización y funciones revelaban profundas conexiones entre las estructuras de todos los animales. A la par, se iniciaba la secuenciación de genomas que se presumían sencillos, los bacterianos. Desde entonces ha cambiado mucho el rostro de la ciencia. Las técnicas moleculares permiten la inspección e incluso la manipulación genética de organismos fuera del laboratorio. Se han secuenciado genomas de organismos de interés en la evolución de los vertebrados, una tarea que prosigue. En noviembre de 2018 arrancó en Londres el Proyecto Biogenoma de la Tierra, de diez años de duración y concebido para secuenciar el genoma de un millón y medio de especies eucariotas. Se han descubierto y descrito nuevos fósiles. Muchas ideas que se creían asentadas han caído. Todo ello ha propiciado un cambio drástico en la concepción de la evolución de los vertebrados en los últimos veinte años.

Con todo, no podemos explicar todavía el hilo conductor que nos lleve de invertebrados a vertebrados. Los parientes vivos de los equinodermos son muy pocos y, cuanto más sabemos de ellos, más claro resulta que evolucionaron hace mucho tiempo, siguiendo una trayectoria peculiar que no nos permite usarlos para reconstruir el precursor universal de los vertebrados. Pisamos, en cambio, terreno más firme cuando abordamos la filogenia de grupos determinados. Un caso estudiado ha sido el de los pterosaurios, el primer grupo vertebrado conocido que ha adquirido en el curso de la evolución un vuelo poderoso, adelantándose varios millones de años a aves y murciélagos. De un tamaño que oscilaba entre el del gorrión y un aeroplano pequeño, los pterosaurios vivieron durante el período entero de los dinosaurios y se extinguieron con ellos. Poseían picnofibras, filamentos pequeños, en la cabeza, cuero y extremidades. Estas estructuras podrían compartir un origen evolutivo con las plumas de dinosaurios y aves. El antepasado común de pterosaurios, dinosaurios y aves podría haber sido capaz de producir picnofibras.

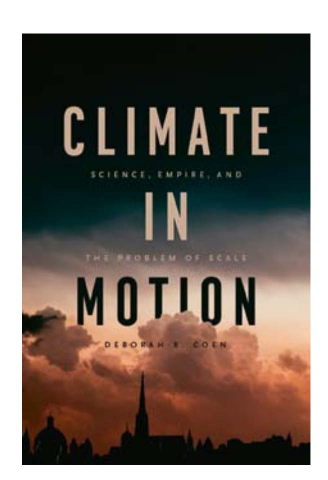
En la definición de vertebrado entra la presencia de una cabeza conformada, distinta, con un rostro dotado de un ojo a cada lado y una boca central. En los invertebrados hallamos todo un repertorio de ojos, tentáculos, partes bucales, cuando no un extremo frontal sin ojos ni rasgos distintivos. También los insectos poseen cabeza, pero su construcción difiere de la de los vertebrados. Los ojos de los insectos, por botón de muestra, constan de numerosas unidades repetidas, no de un cristalino flexible y único. Los oídos se encuentran en las patas y respiran a través de finos poros repartidos por el cuerpo. Por tanto, la cabeza de los insectos siguió un curso distinto del de la encefalización de los vertebrados, lo que no obsta para que se den fenómenos de convergencia entre unos y otros.

Los vertebrados se conforman alrededor de un esqueleto interno de cartílago que, en muchos casos, se refuerza con tejidos más duros (como el tejido óseo, la dentina y el esmalte). Aunque encontramos tejido cartilaginoso en distintos organismos del reino animal, hueso, dentina y esmalte son tejidos exclusivos de los vertebrados. El principal mineral constituyente de los tejidos duros de los vertebrados es el hidroxiapatito, una forma de fosfato de calcio. Las conchas y otros tejidos duros de los invertebrados están hechos de una sustancia diferente, el carbonato cálcico.

La diferencia fundamental, sin embargo, hay que buscarla en el genoma, que explica todas las otras. Todos los vertebrados comparten múltiples rasgos morfológicos y genómicos peculiares. Les caracteriza una profunda reelaboración del plano

corporal de los cordados, y adquirieron unos genomas exclusivos merced a una doble duplicación del genoma entero. En efecto, la diferencia genómica más prominente entre vertebrados y cordados no vertebrados es la reconformación del complemento génico que siguió a las dos tandas de duplicación del genoma (lo que se conoce como «hipótesis 2R») que aconteció en la base del linaje de los vertebrados. Esos episodios mutacionales de gran escala posibilitaron, a buen seguro, la adquisición de innovaciones evolutivas en la morfología. En efecto, si se producen dos genes donde antaño solo había uno, cada gen puede tomar su propio rumbo.

—Luis Alonso



CLIMATE IN MOTION
SCIENCE, EMPIRE, AND THE PROBLEM OF SCALE
Deborah Coen
The University of Chicago Press, 2018

Las raíces imperiales de la climatología

De cómo el Imperio austrohúngaro dio forma a una disciplina científica con vocación transnacional para fundamentar la unidad de una amalgama multicultural

El Imperio austrohúngaro, una potencia mundial regida por la excéntrica monarquía de los Habsburgo, era una fuerza a tener en cuenta durante los frenéticos cincuenta años que precedieron a 1918. En su exhaustivo y ampliamente documentado *Climate in motion*, la historiadora Deborah Coen explora una faceta menos conocida de aquel imperio tan aparatoso: su función como crisol de la climatología moderna. Los científicos imperiales formaban un brillante elenco, desde el meteorólogo Julius Hann, que estudió las relaciones entre los vientos dominantes, las lluvias y las temperaturas medias, hasta el geógrafo Alexander Supan, que estableció el sistema de clasificación de las zonas climáticas a escala mundial.

Coen examina la sociedad y la cultura imperiales para entender por qué el Gobierno y los dirigentes científicos austrohúngaros destinaron ingentes recursos a la meteorología y la climatología. Según la autora, la fuerza motriz se halla en la necesidad política y social de apuntalar una incómoda alianza multinacional que comprendía las actuales República Checa y Eslovaquia, así como partes de Polonia, Italia y Rumanía, entre otros territorios. Los historiadores suelen sostener que la ciencia se integra siempre en el contexto de un espacio y un tiempo específicos. Coen lo demuestra aquí de forma inequívoca.

La extensa narración abarca tres cuartas partes de un siglo, desde 1850 hasta 1925. Coen ha consultado numerosos archivos para conocer las entrecruzadas trayectorias profesionales de más de una docena de figuras notables: meteorólogos, botánicos, geógrafos, geólogos, pintores y escritores. Anton Kerner, por ejemplo, observó que la distribución geográfica de las plantas servía para determinar el pasado climático. También figuran Adalbert Stifter, novelista, escritor de viajes y pintor de paisajes sumamente popular; Emanuel Purkinyě, pionero checo de la microclimatología; y Wilhelm Schmidt y Felix Exner, que se hallan entre los primeros en simular en un laboratorio la circulación atmosférica y las alteraciones que en ella produce la topografía.

Dos temas principales entrelazan lo que, en esencia, consiste en una colección de ensayos más o menos cronológicos y conectados entre sí. El primero guarda relación con el esfuerzo del imperio por mantener la unidad dentro de la diversidad. El segundo corresponde al problema de la escala: un factor fundamental en climatología que abarca desde los microclimas hasta la circulación global.

Tras una serie de guerras, desde mediados del siglo XVIII hasta la era napoleónica, el joven Imperio austriaco (1804-1867) había sufrido enormes pérdidas territoriales, por lo que invirtió gran parte de su energía en amalgamar el territorio que le quedaba. En 1867, un compromiso alcanzado por los Habsburgo con los húngaros dio lugar a una colección más extensa y multiétnica de reinos, principalmente centroeuropeos, bajo una única corona imperial.

El nuevo Imperio austrohúngaro incluía más de diez grandes grupos de lenguas, un territorio que abarcaba desde montañas alpinas hasta estepas, y un sistema de transporte y comunicación que se mantuvo rudimentario hasta bien entrado el siglo XIX. Tal y como señala Coen, los sucesivos Gobiernos bajo el largo reinado del emperador Francisco José I de Austria dirigieron a los estudiosos hacia el objetivo de demostrar que todo pertenecía a una sola bandera. Aquello era una cuestión fundamental en una época de consolidación nacional en torno a las unidades lingüísticas. Por ejemplo, las laxas confederaciones entre Alemania, antes de su unificación, e Italia, pudieron unirse en torno a una única lengua nacional y la reivindicación de un origen étnico común. Pero esa idea no podía aplicarse a la mezcla cultural que conformaba el Imperio austrohúngaro.

Universidades, institutos, museos, herbarios, redes de observación, editoriales y departamentos gubernamentales establecieron la climatología, la meteorología y la metáfora de la circulación atmosférica como la prueba científica de la «naturalidad» del imperio. En conjunto, se desarrolló una ciencia diseñada para demostrar la existencia de una interdependencia dinámica entre regiones con una inmensa diversidad topográfica, hidrográfica y botánica. El viento procedente de Austria traía consigo lluvias a la planicie húngara, y las nieves alpinas alimentaban las tierras del Danubio. En otras palabras, cada región proporcionaba algún elemento climático fundamental del que carecían las regiones vecinas.

Tales ideas impregnaron la sociedad y fueron recogidas por economistas como Emanuel Hermann, que consideraba la climatología como un modelo para el análisis espacial de la economía imperial. El concepto, a su vez, fue desarrollado por liberales como el socialdemócrata Karl Renner, quien argumentaba que, en realidad, la diversidad generaba unidad y

que el comercio crecía por medio del intercambio de mercancías sobrantes entre regiones. Implícita y explícitamente, las interdependencias climáticas se utilizaban para establecer las bases de la unidad política y económica en un alborotado imperio políglota.

Muy ligado a ello, se insistía en estudiar el clima tanto a micro- como a macroescala. La topografía y la hidrografía de una región generan climas en áreas cuya extensión abarca desde escasos kilómetros hasta continentes, y buena parte del trabajo de la climatología consiste en integrar esas zonas tan diversas. Pero aquel énfasis en la escala nacía de una necesidad de unidad a nivel político, económico y social.

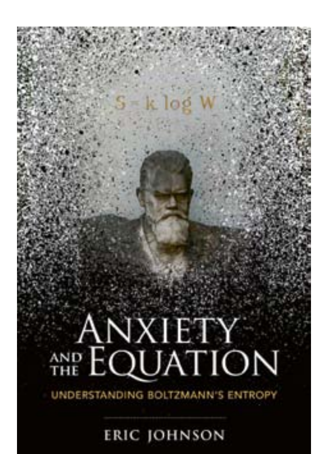
En primer lugar, los investigadores estudiaron las condiciones a escalas muy pequeñas con el fin de satisfacer necesidades económicas y aspiraciones políticas regionales. Más tarde estas se integrarían en un marco imperial más amplio, en especial en los datos y mapas de la enorme colección de volúmenes *Climatography of Austria*, publicada entre 1904 y 1919, una descendiente mucho más detallada del tratado *Cosmos*, escrito en 1845 por el polímata alemán Alexander von Humboldt. En tal contexto, la política, lejos de entrometerse, estableció una lógica para desarrollar un tipo determinado de ciencia: descriptiva, dinámica y centrada en la interdependencia. Aquella labor investigadora fue el semillero de la climatología moderna. Después de que el imperio colapsara en 1918, catastróficamente debilitado por la Primera Guerra Mundial, la disciplina fue retomada por Alemania, Rusia, Austria, Gran Bretaña y Norteamérica.

Pero el complejo y reflexivo estudio de Coen trata muchos más aspectos. La historiadora analiza la manera en que el imperio promovió la popularización de la ciencia, dirigiendo a expertos y apoyando la investigación a gran escala. Un enfoque que enfatizaba la utilidad patriótica, económica, cultural e incluso recreacional de la ciencia. Pero el hecho de que la climatología naciera a partir de un contexto de políticas y normativas, de las que nunca se alejó mucho durante su desarrollo, merece precisamente este tipo de estudio en un momento en el que lidiamos con las ramificaciones de la climatología actual.

—Mott Greene
Departamento de Ciencias de la Tierra y del Espacio
Universidad de Washington

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 559, págs. 178-179, 12 de julio de 2018.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2019

Con la colaboración de nature



ANXIETY AND THE EQUATION
UNDERSTANDING BOLTZMANN'S ENTROPY
Eric Johnson
The MIT Press, 2018

La entropía, o una cuestión de ignorancia

Un excelente ejercicio de divulgación sobre uno de los grandes protagonistas y una de las grandes ideas de la historia de la física

El 5 de septiembre de 1906, Ludwig Boltzmann —la estrella de la física teórica austríaca del momento— ponía fin a su vida durante unas vacaciones en el pintoresco pueblo de la costa adriática que años después inspiraría a Rainer Maria Rilke uno de sus mejores poemarios, las *Elegías de Duino*. El trágico suceso probablemente no sorprendió a los que mejor le conocían. Sus problemas psicológicos, agravados por múltiples achaques físicos, le habían perseguido durante décadas, llevándole ya a un intento de suicidio durante su breve período como profesor de la Universidad de Leipzig.

La muerte de Boltzmann es el punto de partida que Eric Johnson toma en *Anxiety and the equation* para embarcar al lector en un apasionante viaje que le permitirá profundizar tanto en la atormentada personalidad del científico austríaco como en el significado físico de la entropía, uno de sus grandes logros intelectuales.

Para valorar la importancia de este resultado tenemos que viajar a los tiempos de la Revolución Industrial. El desarrollo y perfeccionamiento de las máquinas de vapor había puesto el estudio de los fenómenos térmicos en el centro del interés de científicos e ingenieros. El resultado fue la formulación de una nueva rama de la física, la termodinámica, basada en dos principios cuya validez era considerada universal.

El funcionamiento de una máquina térmica reside en la producción de trabajo mecánico a partir de calor. En 1842, Julius Robert von Mayer había propuesto que el calor no era más que una forma de energía. Su intuición sería demostrada en una serie de experimentos realizados por James Prescott Joule durante la década de 1840, que además le permitieron medir el factor de conversión entre calor y trabajo mecánico. El primer principio de la termodinámica simplemente afirma que la energía total siempre se conserva. Por tanto, las máquinas térmicas transforman energía calorífica en energía mecánica con una cierta eficiencia.

El segundo principio, por otra parte, establece algo que nos es familiar: si ponemos en contacto dos objetos a diferente temperatura y no ejercemos ninguna acción sobre ellos, el calor siempre fluirá del cuerpo caliente al frío, nunca al revés. Rudolf Clausius dio en 1865 con una forma más general a este enunciado. Para ello introdujo una nueva magnitud física, la entropía, que junto con la energía caracterizaba el sistema. Así, el segundo principio de la termodinámica nos dice que, en un sistema aislado, la entropía nunca puede disminuir. Y, en particular, si el proceso es irreversible (como cuando diluimos sal en agua), la entropía siempre aumenta.

La formalización de la física de los fenómenos térmicos coincidió temporalmente con el debate sobre la realidad de los átomos. El atomismo tenía ya una larga historia, desde sus inicios en la Antigüedad, pasando por su importante papel durante la Revolución Científica a través de autores como Pierre Gassendi, Robert Boyle e Isaac Newton, y culminan-

do con su introducción en la química por John Dalton a principios del siglo XIX. La cuestión que se discutía ahora era si los átomos eran meros artificios teóricos, útiles para explicar heurísticamente algunas leyes físicas o químicas, o por el contrario existían como entidades físicas reales aunque inobservables. Este problema rebasaba los límites científicos para convertirse en una cuestión epistemológica. En el bando atomista militaban figuras de la talla de James Clerk Maxwell, Clausius y el propio Boltzmann. Los que negaban la existencia de los átomos, por su parte, contaban con personalidades como el químico Wilhelm Ostwald y una de las grandes figuras de la filosofía de la ciencia decimonónica, Ernst Mach.

Un aspecto que hacía interesante la termodinámica era que su validez parecía ser independiente de la estructura microscópica de la materia, algo que impresionaría al joven Albert Einstein. Pero si, como Boltzmann y otros afirmaban, los átomos realmente existían, debía ser posible deducir los principios de la termodinámica a partir de las leyes de la mecánica newtoniana, las cuales gobiernan el movimiento de los constituyentes fundamentales. De hecho, ya en el siglo XVIII, Daniel Bernoulli, uno de los pioneros de la teoría cinética de los gases, había interpretado la presión de un gas como el efecto de las colisiones de las moléculas que lo forman contra las paredes del recipiente, explicando además la ley de Boyle de los gases ideales.

La primera ley de la termodinámica podía ser fácilmente entendida en el contexto de la teoría cinética de la materia, dado que la conservación de la energía es un principio central de la mecánica clásica. La situación es mucho más complicada en el caso de la segunda ley, y en concreto en el de la entropía. El obstáculo radica en que, en la mecánica newtoniana, el tiempo no tiene ninguna dirección preferente: para revertir la evolución temporal de cualquier sistema mecánico basta con invertir simultáneamente las velocidades de todas las partículas que lo constituyen. El segundo principio de la termodinámica, sin embargo, establece una «flecha del tiempo» clara, la definida por el aumento de la entropía. ¿Cómo es posible, pues, obtener irreversibilidad a partir de la mecánica clásica?

Esta es la pregunta a la que *Anxiety and the equation* da respuesta. Utilizando ejemplos sencillos y en un estilo llano no exento de humor, el libro nos muestra paso a paso cómo Boltzmann consiguió interpretar la entropía como una medida de nuestra ignorancia acerca de la configuración microscópica de un sistema físico. La aparente irreversibilidad termodinámica es meramente estadística, ya que los estados macroscópicos con alta entropía son mucho más probables que aquellos con entropía baja. Esto hace que las violaciones del segundo principio sean posibles, aunque altamente improbables. Observarlas requeriría esperar muchas veces la edad del universo. Este hecho dará lugar a un intenso debate entre Boltzmann y Ernst Zermelo, asistente por entonces de Max Planck en Berlín.

Para hacer la lectura de libro más amena y situar el problema en su contexto histórico, los capítulos dedicados a las ideas de Boltzmann sobre la entropía están intercalados con otros en los que el autor nos describe las vicisitudes científicas y vitales del protagonista. Así, a la vez que aprendemos conceptos como microestado y macroestado, o simplemente qué es un logaritmo, asistimos a los problemas de adaptación de Boltzmann a la encorsetada vida social y académica berlinesa, sus controversias con Zermelo o sus incisivas impresiones de la sociedad californiana en lo que él mismo llamó su «viaje a El Dorado».

La interpretación estadística de la entropía tiene una importancia radical en la física moderna, también en el mundo cuántico, de ahí la pertinencia de un libro que pone una idea tan central al alcance del gran público. Asimismo, ha encontrado su lugar en otros campos, como la teoría de la información. Por ejemplo, en la física de los agujeros negros, el famoso problema de la información se basa en la idea de que la «entropía de Bekenstein-Hawking», definida por el área del horizonte de sucesos de un agujero negro, es, en el espíritu de Boltzmann, una medida del número de sus estados microscópicos.

Anxiety and the equation es una buena muestra de cómo usar la historia de la ciencia como vehículo para la divulgación científica. No se trata de un libro de historia de la física ni de una biografía científica de Boltzmann. Es simplemente una estupenda obra de divulgación sobre un tema fascinante, en el que el lector también aprenderá sobre la vida, los logros y la tragedia personal de uno de los grandes nombres de la historia de la física.

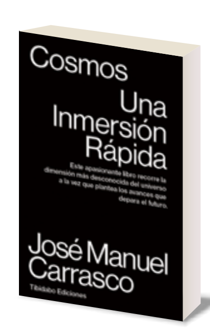
—Miguel Á. Vázquez-Mozo
Instituto Universitario de Física Fundamental
Universidad de Salamanca

NOVEDADES

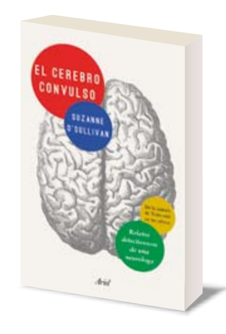
Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



LOS FÓSILES DE NUESTRA EVOLUCIÓN
UN VIAJE POR LOS YACIMIENTOS PALEONTOLÓGICOS QUE EXPLICAN NUESTRO PASADO COMO ESPECIE
Antonio Rosas
Ariel, 2019
ISBN: 978-84-344-2964-2
304 págs. (20,90 €)



COSMOS
UNA INMERSIÓN RÁPIDA
José Manuel Carrasco
Tibidabo Ediciones, 2019
ISBN: 978-84-9117-927-6
180 págs. (15 €)



EL CEREBRO CONVULSO
RELATOS DETECTIVESCOS DE UNA NEURÓLOGA
Suzanne O'Sullivan
Ariel, 2019
ISBN: 978-84-344-2967-3
336 págs. (19,90 €)

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

MAYO

1969

Enfermos por el plomo

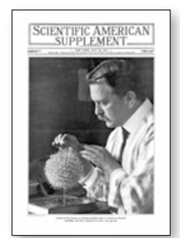
«Aunque en EE.UU. los pigmentos de plomo se eliminaron de la pintura de interiores hace unos 20 años, las paredes y la madera de muebles de casas antiguas aún conservan varias capas de pintura a base de plomo. Por ello, el envenenamiento por plomo, en el pasado un riesgo para los pintores, es ahora una enfermedad sobre todo de los niños. Los afectados, de entre uno y cinco años, viven en casas suburbiales y mordisquean sin parar los desconchones de pintura que caen de unas paredes y unos alféizares en mal estado. En una conferencia celebrada en marzo en la Universidad Rockefeller, los participantes estimaron que el envenenamiento por plomo entre los niños es más frecuente de lo que se cree, pero señalaron que esta "epidemia silenciosa" podría atajarse con unas medidas médicas, sociales y legales enérgicas.»

Plata para la guerra

«De la planta de separación electromagnética de Oak Ridge (Tennessee) se han retirado y devuelto al Departamento del Tesoro más de 2100 toneladas de plata por valor de 124 millones de dólares. Esta cantidad era parte de las casi 15.000 toneladas de ese metal prestadas en 1942 al proyecto Manhattan para que se convirtieran en las bobinas de los gigantescos electroimanes de los "calutrones" empleados para separar el uranio 235, fisionable, del no fisionable uranio 238. El proceso pasó por numerosas dificultades técnicas, pero ayudó a producir el U-238 altamente purificado de la bomba atómica que destruyó Hiroshima. Esa plata, cuyo valor era entonces de 400 millones de dólares, se usó como sustituto del cobre, que a la sazón escaseaba.»



1969



1919



1869

1919

Sexo e intersexo

«Las elaboradas investigaciones sobre los fenómenos sexuales en vegetales y animales realizadas por el doctor Arthur Mangun Banta, patrocinadas por el Instituto Carnegie, llevaron al biólogo a algunas ideas interesantes. "Llegará un momento", afirma, "en que será imperativo revisar nuestras ideas acerca de la fijeza del sexo, ante la relatividad que de él muestran tan rotundamente las palomas híbridas, las polillas híbridas y distintas especies de cladóceros [pulgas de agua]." Cita los fenómenos de la "gallina que cacarea" y del "gallo clueco", de la mujer masculina y del hombre afeminado como ejemplos llamativos de sexos intermedios que refutan la común concepción de la masculinidad y la feminidad como fenómenos completos, opuestos y mutuamente excluyentes.»

El peor avión

«Con la muerte, hace pocas semanas, del aviador Jolly, el biplano *Christmas Bullet* cuenta ahora con dos víctimas en su haber. Al día siguiente del mortal accidente, quien escribe estas notas se hallaba casualmente en uno de los campos de aviación de Long Island, donde el infortunado piloto era bien conocido y apreciado. El pesar era bastante intenso entre los aviadores y mecánicos, que criticaban el diseño del biplano sin riostras de William H. Christmas y se referían al anterior desplome del *Bullet*. Jolly, así parece, corrió la misma suerte: en pleno vuelo se partió y se desprendió una de las alas y él se precipitó a tierra. Convenían en gran medida en que ya pasó el momento de experimentar con un diseño de seguridad incierta.»



1869: Las andaderas para niños se han considerado desde siempre una idea magnífica. Pero no lo son.

1869

Andadera para niños

«El aparato aquí representado está pensado para que los pequeños aprendan a caminar, impedir que corran peligro y se hagan daño, y aliviar la preocupación y la ansiedad constantes de madres, niñeras y cuidadoras. En torno al cuerpo del chiquillo se asegura un aro acolchado que se abre merced a una bisagra y se sujeta adecuadamente con un cierre. La base se apoya en ruedecitas de funcionamiento suave que permiten a la andadera moverse y girar sobre el piso. Fue patentada a través de la Agencia de Patentes de Scientific American, en junio de 1866, por P. Pallisard, con quien puede contactarse en Kankakee (Illinois).» *Se ha demostrado después que esas andaderas aumentan el riesgo de lesiones y retrasan la capacidad de andar.*

Búfalos y postes

«En los postes del telégrafo terrestre, los búfalos hallaron una nueva fuente de placer en medio de la desarbolada pradera: la novedad de disponer de algo contra lo que rascarse. Pero resultó un placer demasiado caro para la compañía de telégrafos, pues los animales hacían caer millas de cable a diario con sus sacudidas. Alguien tuvo la brillante idea de hacer traer de San Luis y Chicago cuantos punzones pudieran comprarse, los cuales se clavaron en los postes con el objeto de que lastimaran a los animales y refrenaran su propensión a restregarse. Jamás hubo mayor error. Los búfalos, encantados, iban a rascarse teniendo garantizada una sensación de placer en sus gruesas pieles, hasta que el punzón se rompía o el poste se venía abajo.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XX, N.º 19, 8 DE MAYO DE 1869



INFORME ESPECIAL
DESCIFRAR LA GRAVITACIÓN

EXPERIMENTOS
La gravedad cuántica en el laboratorio
Tim Folger

OBSERVACIONES
Ondas gravitacionales y agujeros de gusano
Pablo Bueno y Pablo A. Cano

TEORÍA
Gravedad cuántica: Domar los infinitos
Astrid Eichhorn y Christof Wetterich

MICROBIOLOGÍA
Jugadores de equipo
Jeffrey Marlow y Rogier Braakman

Las asociaciones microbianas son más frecuentes e influyentes de lo que los científicos podrían haber imaginado.





MEDICINA
Regeneración por otra vía
Kevin Strange y Viravuth Yin

Un fármaco otrora abandonado revela su capacidad de reconstruir órganos dañados.

SISMOLOGÍA
Terremotos en el cielo
Erik Vance

De acuerdo con una nueva y controvertida teoría, los mejores precursores de un gran desastre podrían detectarse a 290 kilómetros por encima de la superficie.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS Antoni Jiménez Arnay
DESARROLLO DIGITAL Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Eva Rodríguez Veiga
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT Mariette DiChristina
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek



DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Prensa Científica, S. A.
Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:

Andrés Martínez: *Apuntes* y *La cultura material en los animales*; Javier Grande: *Apuntes* y *El misterio de las estrellas de neutrones*; Claudi Mans: *Disputas en la tabla periódica*; Fabio Teixidó: *¿Cómo se formaron los Andes?*, *El amplificador meteorológico* y *Las raíces imperiales de la climatología*; M. Gonzalo Claros: *Desenredar el genoma*; Alfredo Marcos: *En la senda de Jesús Mosterín*; Pedro Pacheco: *¿El horóscopo en mi genoma?*; Miguel A. Vázquez Mozo: *¿Es el universo un autómata celular?*; Elisa Vilaret: *Acabar con el silencio*; José Óscar Hernández Sendín: *Superconductividad en el grafeno*; J. Vilardell: *Cómo convertir un teléfono inteligente en un microscopio* y *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España